

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Petrología y Geoquímica
Programa de doctorado “Geología e Ingeniería Geológica”



TESIS DOCTORAL

**El granito como piedra de construcción en Madrid: durabilidad y
puesta en valor**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

David Martín Freire Lista

Directores

Rafael Fort González
María Josefa Varas Muriel

Madrid, 2016

David Martín Freire-Lista

**EL GRANITO COMO PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN EN
MADRID:
DURABILIDAD Y PUESTA EN VALOR.**



**Memoria presentada para optar al grado de doctor con
mención europea en la Universidad Complutense de
Madrid, 2016**

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Petrología y Geoquímica

Programa de doctorado “Geología e Ingeniería Geológica”



**EL GRANITO COMO PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN EN
MADRID: DURABILIDAD Y PUESTA EN VALOR**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR
David Martín Freire-Lista**

Bajo la dirección de los doctores Rafael Fort González
y María Josefa Varas Muriel

Madrid, 2016

EL GRANITO COMO PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN EN MADRID: DURABILIDAD Y PUESTA EN VALOR



EL GRANITO COMO PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN EN MADRID: DURABILIDAD Y PUESTA EN VALOR

David Martín Freire-Lista



Memoria presentada para optar al grado de Doctor con mención Europea de
la Universidad Complutense de Madrid

Tesis doctoral dirigida por:

Dr. Rafael Fort González

Investigador Científico del Instituto de Geociencias del Consejo Superior
de Investigaciones Científicas y la Universidad Complutense de Madrid

Dra. María Josefa Varas Muriel

Profesora Titular de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad
Complutense de Madrid

Vº Bº

Fdo: Dr Rafael Fort González

Fdo: Dra. María Josefa Varas Muriel

Madrid, Enero de 2016

“No hay piedra berroqueña que dende a un año, no ande lisa al pasamano”

Hernán Núñez de Toledo y Guzmán. Refranes o proverbios en romance (Salamanca, 1555) Recopilación de 1508

PRÓLOGO

Son muchos los factores que influyen en el deterioro y pérdida de patrimonio construido. En mi opinión, uno de los más importantes, a parte de la calidad de los materiales de construcción que lo componen, es el factor humano.

El trabajo artesanal, los materiales, las necesidades y el concepto de tiempo han cambiado drásticamente desde la época de elaboración de los sillares de piedra natural que hoy constituyen monumentos y centros urbanos de nuestras ciudades y pueblos. Los cambios sociales generados en el último siglo, junto con la aparición de conceptos como *usar y tirar*, y *arquitectura efímera*, han causado que la *salud* de las piedras de construcción tradicional se encuentre en una situación precaria.

Afortunadamente las técnicas de diagnóstico no destructivas han mejorado considerablemente y renacen conceptos como sostenibilidad, educación ambiental, revalorización y participación ciudadana que han de jugar un rol importantísimo en la conservación del rico patrimonio construido que hemos heredado. Este recurso atrae a un turismo cultural, procedente de todo el mundo, que visita zonas urbanas y rurales de nuestra geografía. Pasear por los centros históricos de ciudades y pueblos, así como por caminos y senderos tradicionales debe ser una experiencia única, en donde cada sillar y piedra evoque formas, costumbres y modos de hacer de un tiempo remoto. El patrimonio construido tiene la frágil ventaja de ser único e irrepetible y, a la vez, constituir un recurso de gran potencial social y económico.

La administración incrementa sus esfuerzos en restauración y conservación, aunque la toma de consciencia del nuevo valor que ha adquirido el patrimonio construido es un reto y una responsabilidad de toda la sociedad, en donde ciencia tiene un papel cada vez más importante.

AGRADECIMIENTOS

Debido al carácter interdisciplinar por el que aboga el grupo de investigación Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio del Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) y con el que he tenido la fortuna de realizar este trabajo, son muchos los organismos y personas con las que he colaborado de una u otra forma. Es por ello que quiero agradecer de todo corazón a quienes con su ilusión, estímulo y desinterés han contribuido a que la elaboración de este trabajo haya sido una de las experiencias más enriquecedoras que he vivido hasta el momento.

Al Dr. Cesáreo Sáez, quien me ha puesto en contacto con el que sería el director del presente trabajo. A la Dra. Sandra Martín Moreno, la lectura de su tesis me ha servido de punto de partida y referente. Al Dr. Francisco Mingarro Martín y a la Dra. Concepción López de Azcona por haber sido los creadores del grupo de investigación en donde se ha realizado esta tesis.

Mi agradecimiento a los siguientes organismos y personas por las facilidades, tanto materiales como personales, proporcionadas durante la investigación: al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto de Geociencias (IGEO), Laboratorio de Petrofísica del IGEO, especialmente a su directora técnica, la Dra. Mónica Álvarez de Buergo Ballester.

A la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), al Departamento de Petrología y Geoquímica de la UCM, especialmente a mis compañeros del grupo de investigación, a los técnicos del taller de preparación de muestras y a los profesores Cecilia Pérez-Soba Aguilar, Carlos Rossi Nieto y Esther Sanz Montero por su ayuda siempre acompañada de una sonrisa. Agradecer al profesor Alfonso Muñoz Martín sus aportaciones en el cálculo de módulos mecánicos.

Al departamento de Biología, Ecología y Ciencias de la Tierra de la Universidad Della Calabria (Italia) en donde he tenido la oportunidad de aprender las técnicas analíticas con las que investigan el amplísimo patrimonio construido italiano durante mi estancia de tres meses.

Agradecer especialmente al Dr. Mauro F. La Russa, al Dr. Silvestro A. Ruffolo, Dra. Donatella Barca, al Dr. Domenico Miriello y a la Dr. Emilia Le Pera y al restaurador Elio Guerra Gracias por mostrarme la forma de construir romana.

Al Dr. Richard Přikryl y Dr. Akos Török, por tenderme la mano y arroparme en los congresos en los que hemos coincidido. Al Dr. Björn Schouenborg, al Dr. Barry Cooper y a la Dra Dolores Pereira, por el apoyo y confianza que me han mostrado.

A los Programas Geomateriales 1 y 2 (S2009/MAT-16 y S2013/MIT-2914) financiados por la Comunidad de Madrid, que han permitido realizar esta investigación, al Campus de Excelencia Internacional de Moncloa, por la concesión del contrato dentro del Programa de Captación de Talentos (PICATA). Agradezco a la Dirección General de Patrimonio de la Comunidad de Madrid, al Archivo de Villa, al Ateneo de Madrid, al Instituto del Patrimonio Cultural de España, Patrimonio Nacional, al Instituto Geológico y Minero de España, al Museo de Ciencias Naturales, al Instituto de Estudios Madrileños, a la Real Academia de la Historia y al Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja por las facilidades prestadas para acceso a documentación clave para la consecución de este estudio.

A los ayuntamientos de Alpedrete, Cadalso de los Vidrios, Colmenar Viejo, Zarzalejo y de Perales de Tajuña, a su alcaldesa Yolanda Cuenca Redondo y especialmente a la Primera teniente de Alcalde y concejal de Urbanismo, Mantenimiento, Educación y Juventud Marisol Bucero Izquierdo por su tesón por sacar adelante todo lo que se propone.

A Javier Pastor, por su confianza y amor por la arqueología, a Javier Martín Platas, cantero de Alpedrete, por su experiencia y asesoramiento, a la asociación de canteros de Colmenar Viejo, al escultor Miguel Sobrino, a Bonifacio Estevan y Alfredo Erias, entre otros muchos.

Y por supuesto, mi mayor agradecimiento a las personas que han disfrutado conmigo de la realización de este trabajo: a mis directores de tesis, el Dr. Rafael Fort González y la Dra. María José Varas Muriel, por sus importantes orientaciones, valiosos comentarios y constante apoyo.

Agradecer también a quienes me han transmitido su pasión por la ciencia, la geología y la vida, quienes han sido claves mi desarrollo personal y profesional en distintas etapas de mi formación. A la primera maestra, Rosa Franco, con su dedicación y amor por su trabajo ha logrado que aquel niño de 8 años haya conseguido terminar, años más tarde, este trabajo. A mi profesor del Instituto Isaac Díaz Pardo, Carlos Vales, quien me ha transmitido su amor por la geología. A todos y cada uno de mis profesores de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad de Oviedo, especialmente a Manuel Rubio y Angelines Fernández, con quienes comencé mi andadura científica con una beca de Colaboración en el Departamento de Cristalografía y a Rosa Esbert por su calidad humana y profesional.

A Luís José Provença De Figueiredo Neves, del Departamento de Ciências da Terra de la Universidad de Coimbra (Portugal) por su disponibilidad y ayuda durante mi estancia en la Universidad de Coimbra. Al Dr. Antonio Gilberto Costa, del Departamento de Petrología e Geoquímica de Metamorficos, Rochas Industriais de la UFMG (Brasil) por enseñarme, tan de cerca, las piedras de construcción de Brasil. A Juan Francisco Arminio y Felipe Audemard por magistrales clases del Master de Geofísica en la Universidad Simón Bolívar (Venezuela). Al equipo de exploración de Repsol-YPF en Houston, especialmente a Max Torres, Eva Moldovanyi y Ángela Echanove por sus enseñanzas de sismica aplicada.

Al Dr. Esteve Laubach y la Dra. Julia Gale, del FRAC, Bureau of Economic Geology (University of Texas at Austin) les expreso mi gratitud por sus desinteresadas orientaciones, por haberme transmitido su pasión por las fracturas durante mi intenso año de investigación en la UT. Su estímulo ha sido clave para la elección del tema de mi investigación.

Dedico esta tesis a los maestros que me han transmitido el interés por el conocimiento. Quisiera empezar por mi familia, especialmente mis padres y hermano, quienes estratégicamente han despertado en mí el interés por el análisis de la naturaleza y del medio que me rodea desde muy temprana edad. A Manuel Sánchez, Marañas, quien es y será un referente de honestidad en mi vida.

A José Manuel González Fernández, quien me ha transmitido su pasión por la historia y arqueología y enseñado que con el trabajo y constancia se puede cambiar la sociedad.

Por último, a mi director Rafael Fort González, por su enorme disponibilidad, asistencia e interés por la ciencia. Su vasto conocimiento sobre geomateriales, junto con su crítica, siempre constructiva, han sido esenciales a la hora de aclarar conceptos. Su entereza como persona y valía científica servirán de ejemplo y referencia en mi carrera.

Esta tesis es parte de cada una de estas personas, a quienes se la dedico con todo mi cariño. Así como también a mis amigos personales, quienes me han mostrado tanta generosidad, paciencia, comprensión y ánimo a lo largo de estos años de intensa investigación.

ÍNDICE

-1. Summary	1
-1. Resumen	7
-2. Objetivos	13
-3. Introducción	17
-3.1. La piedra berroqueña como material de construcción en Madrid	19
-3.2. El legado del granito de construcción	21
-3.3. Antecedentes del estudio de las piedras de construcción	24
-3.4. Corte y labra tradicional del granito	37
-3.5. El deterioro del granito	41
-4. Materiales	47
-5. Metodología	49
- 5.1. Propiedades petrográficas	49
- 5.2. Propiedades dinámicas	52
- 5.3. Propiedades estructurales	54
- 5.4. Propiedades hídricas	55
- 5.5. Propiedades superficiales	57
- 5.6. Propiedades mecánicas	58
- 5.7. Ensayos de envejecimiento artificial acelerado	59
- 5.8. Cartografía de materiales pétreos y formas de deterioro	61

-6. Artículos científicos

63

-6.1. Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. (Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology) 65

-6.2. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. (Journal of Geophysics and Engineering) 77

-6.3. Freeze-thaw fracturing in building granites (Cold Regions Science and Technology) 93

-6.4. Thermal shock-induced microcracking in building granite (Engineering Geology) 107

-6.5. Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes (Periodico di Mineralogia) 141

-6.6. Microfisuras de descompresión y direcciones de corte en granito de construcción. 175

-6.7. Origen y evolución de desplacados y descamados en el granito de la Plaza Mayor de Madrid. 211

-6.8. The piedra berroqueña region: candidacy for Global Heritage Stone Province status. (Geoscience Canada) 221

-6.9. Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation. (Episodes) 247

-6.10. Nomination of Zarzalejo granite, a Spanish heritage building stone, as a “Global Heritage Stone Resource” (Energy Procedia) 257

-7. Capítulo de libro “Letras”. Editorial Tempora Libros

269

-7.1. Orografía y primeros caminos del arrabal 269

-7.2. Piedras de construcción en el Barrio de las Letras 270

-7.3. Urbanismo del Barrio de las Letras	281
-7.4. Pavimentación en el Barrio de las Letras	287
-7.5. Inventario de la piedra de construcción	291
-7.6. Deterioro de las piedras de construcción	294
-7.7. Bibliografía	298
-8. Conclusiones	301
-9. Conclusiones generales	311
-10. Conclusions	313
-11. General conclusions	323
-12. Referencias bibliográficas	326

ANEXOS

ANEXO I.

Catastro Marqués de la Ensenada de varios lugares de las cercanías de Madrid en el que se citan actividades relacionadas con la producción de granito

ANEXO I.a.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Collado Villalba
Alpedrete

ANEXO I.b.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Cadalso de los
Vidrios

ANEXO I.c.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Moral Zarzal

ANEXO I.d.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Zarzalejos

ANEXO II.

Producción de granito en Diccionario geográfico de Miñano y Madoz, 1826-1829

ANEXO III

Archivo de la Villa Conde Duque (Madrid): Doc. 1-2-24. Fechado en Madrid, 17 noviembre 1612.

ANEXO IV

Transcripción del documento completo conocido como “Instrucción de Sabatini”. (1761)

ANEXO V

Varios documentos relacionados con los materiales de construcción de la fuente de la Cibeles.

ANEXO Va.

Transcripción de un párrafo en donde se habla de la piedra de Redueña.

ANEXO Vb.

Plano de la Fuente de la Cibeles con escritura de Villanueva. 1777. (Museo de Historia de Madrid)

ANEXO Vc.

Leralta, J., 2001. Madrid: cuentos, leyendas y anécdotas, Volumen 1. Silex Ediciones, 2001 - 296 páginas. REDUEÑA. Las canteras de la Cibeles. (Fragmento)

ANEXO Vd.

Cibeles es de Redueña. Un pequeño pueblo reclama la paternidad de las piedras del monumento. Artículo periodístico publicado en El País el 12 de Agosto de 1994 por Vicente González Olaya

ANEXO Ve.

Cibeles, una diosa tan famosa como desconocida. Fragmento de un artículo periodístico publicado en el diario ABC el 15 de Junio de 2014 por Mónica Arrizabala

ANEXO VI

Transcripción del libro de Diego de Sagredo: Medidas del Romano, 1526 pág. 82.1526

1-SUMMARY

The thesis entitled "*The granite stone used for construction in Madrid: durability and value*" is divided into 10 scientific articles published or under review in various international indexed journals and a chapter of an informative book about the building materials used in the Letras district of Madrid.

The first objective is to establish the history of use, quality and durability of four granites from the Sierra de Madrid which are widely used in heritage buildings. The second objective is to assign a grade or value to them according to their use.

The use of stone construction has been determined by the proximity of geological resources. The stone materials that have been used historically in the City of Madrid originated in the Spanish Central System and the Tertiary Basin of Madrid. Flint has been used from the 9th to the 11th centuries, when it was gradually replaced by Redueña dolomite and granite, traditionally called "Piedra Berroqueña" (Fort et al., 2013a,b). The technological advances of the 18th century favoured the underground limestone quarry of Colmenar de Oreja. However, the piedra berroqueña extraction has provided most of the building stone used in Madrid.

For centuries the extraction of piedra berroqueña has represented the main economic activity in many villages of the Guadarrama Mountains and Somosierra (Freire-Lista and Fort, 2015a, b). These mountains are part of the Spanish Central System. They range in a southwest-to-northeast direction through the provinces of Madrid, Segovia and Avila. Occupying an area of approximately 100 km in length and 40 km wide, several varieties of granite are present. This stone has been incorporated into a large number of buildings that are key to the historical, cultural and rural tourism currently enjoyed in Madrid.

This thesis focuses particularly on the granites of Alpedre, Cadalso de los Vídríos, Colmenar Viejo and Zarzalejo that are an important aspect of the built heritage in the City of Madrid (Freire-Lista et al., 2014a, b, 2015a, b, and c). A thorough literature review has been conducted on the exploitation and use of these granites, which form part of the many monuments,

buildings, “street furniture”, cobblestone streets and almost all rural architecture and civil works of the City. These include modern buildings, shopping centres, the Reina Sofia Museum and the Bank of Spain. The terminals of the airports of Athens and Cork, the British consulate in Hong Kong and malls in China are examples of buildings made with *piedra berroqueña*.

Alpedrete granites and Zarzalejo (Freire-Lista et al., 2015d, e, f) have been the most used in the historic architecture of the City of Madrid. Representative monuments such as the Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (16th century), the Royal Palace (18th century), the Puerta de Alcalá (18th century), the National Library (19th century) and the Catedral de la Almudena (20th century), to name a few, are built with these granites.

A petrological analysis of each of these granites and an extensive documentary compilation of the records on the study of granite throughout history has been performed.

The stone durability is strongly influenced by the degree of anisotropy, a property which determines its quality and decay resistance against the aggressive action of atmospheric agents such as water and temperature. A study of the anisotropy was performed on the nine types of stones most used in the built heritage of central Spain. Six indices of anisotropy have been used to establish which best defines the differential degradation processes observed in the stones extracted from the same quarry (Fort et al., 2011). The appropriate choice of building materials according to their quality, ensures a greater resistance to decay and, therefore, increases its durability. Materials with lower anisotropy and porosity have greater durability. For these reasons, natural stone used for both restoration of architectural heritage and for new work should be based on their anisotropy and petrophysical properties.

The four granites above were subjected to 280 cycles of artificial ageing using accelerated freeze / thaw, following UNE-EN 12371, 2001/2011 (Freire-Lista et al., 2015b), and 42 thermal shock cycles, according to European Standard UNE EN 14066, 2003/2014. To determine the response of each granite to artificial accelerated aging processes, petrographic and petrophysical analyses were performed (using destructive and non-destructive techniques) before, during and

after each test. With the combination of these analyses, the evolution of microcracks was determined, distinguishing between inter-, intra- and trans-crystalline microcracks, of the various constituent minerals of the studied granites. Thus, we identified the causes and effects of the decay on granite monuments and buildings.

Mineralogy, texture and physical-chemical alteration of granites play a prominent role in the decay. Decay mechanisms varied in the four types of granite and for each artificial accelerated aging test. Petrophysical results such as variation of density, porosity, propagation velocity of ultrasonic waves, mechanical properties (measured indirectly) and colour have corroborated with the quality of the four granites studied. The main decay caused by artificial accelerated aging tests was the creation of new microcracks and the coalescence of pre-existing microcracks.

The study of microcracks generated in feldspar granites of Alpedrete and Zarzalejo during the freeze / thaw and thermal shock served to understand the process of decay. Potassium feldspars and plagioclases developed different mechanisms of microcracking due to their microstructure: crystallographic anisotropy, twins, exfoliation planes and multi-compositional zones (Freire-Lista et al, 2015c.). The microcracks propagation is produced predominantly from pre-existing microcracks in minerals and the contact between crystallographic planes. The compositional zoning of plagioclase crystals generated concentric microcracks.

To understand the decay of stones and granite sculptures, the anisotropy of Alpedrete granite according to their cutting planes has been studied (Freire-Lista and Fort 2015c). That is, the rift, or direction in which the stone is most easily split; grain, direction of the second easiest splitting and hardway, direction in which the stone is harder to split. Different petrographic and petrophysical properties have shown that the rift plane is determined by the exfoliation microcracks. Traditional quarrymen have used granite anisotropy and the orientation of exfoliation microcracks to cut and use it. The rift plane, defined by the coalescence of exfoliation microcracks has been preferably used as the facing blocks (ashlars) of historic buildings.

The influence of climate, orientation, style and exfoliation microcracks has been studied (flat traditional style of granite blocks) on the decay of granite in the Plaza Mayor in Madrid (Spain). This rectangular square is oriented according to the cardinal points. Thus, each face of the prismatic columns has its own microclimate. Microcracks are generally vertically orientated and show decreased density and length further into the column, i.e., away from the patterned surface. These intra- and trans-crystalline microcracks are straight.

The decay of the orthohedral granite columns of the Plaza Mayor of Madrid has been mapped; it has been determined that the scaling is the most common type of decay in traditionally carved granite ashlars. The height, distribution and orientation of the scaling were measured. The scaling generally occurs at the bottom of the columns with a thickness which usually does not exceed four millimetres. The orientation of exfoliation microcrack in the stones has been key to understanding their decay.

The work carried out for the enhancement of piedra berroqueña facilitated the publication of three scientific articles in international journals. One for the candidacy as "Global Heritage Stone Province" (GHSP) for the piedra berroqueña producing region and two for the candidatures of Alpedrete and Zarzalejo granites as "Global Heritage Stone Resource" (GHSR). These Designations are an initiative of the International Union of Geological Sciences' Heritage Stone Task Group (HSTG) and International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission C-10, Building Stone and Ornamental Rock, which "seeks international recognition for natural stone resources that have achieved widespread utilization in human culture". Furthermore an informative book has also been published about the history of the building materials used in the Letras district in Madrid. This district is one of the most tourist neighbourhoods of Madrid which preserves the traditional stones used in the construction of most of its buildings. The stones that are part of its built heritage are very susceptible to decay due to their high exposure to atmospheric agents. Four congress contributions were presented at international level and have made Geomonumental Routes, creating a bridge between those involved in the conservation of built heritage such as quarrymen of the Sierra de

Madrid, Applied Petrology for Heritage Conservation Complutense University of Madrid, Cultural Heritage of the University of Calabria (Italy), the Heritage Stone Task Group, the Council of Madrid and its municipalities.

The characterization of the decay in these granites has allowed five scientific articles to be published in international journals including submissions at five congresses, at international and two national conferences. This thesis has highlighted that the anisotropy of Alpedrete granite microcracks is determined by decompression, which are generally parallel to the surface of the quarry. Quarrymen have used microcrack decompressions to assist in the traditional cutting of stones ("rift" direction or easier cutting) since the cut in this direction is due to the coalescence of exfoliation microcrack that are in the same plane. In other words, co-planar fractures generating a surface meet. This plane is preferably chosen to form the facing or "face" side of blocks on the facades of traditional buildings. Thus, exfoliation microcracks are oriented parallel to the wall and also perpendicular to the ground surface, providing capillary rise. The scaling is one of the most common types of damage on the surface of granite ashlar in the City of Madrid. Normally they are produced parallel to the exfoliation microcrack.

With a total of 10 articles, a chapter of a book and 10 conference contributions, this thesis offers useful information to history, archaeology, restoration, fine art and architecture and is based on the principle that geology supports these disciplines.

1-RESUMEN

La tesis titulada “El granito como piedra de construcción en Madrid: durabilidad y puesta en valor” está estructurada en 6 artículos científicos publicados, 1 aceptado y otro en revisión, en diferentes revistas internacionales indexadas y un capítulo de un libro divulgativo.

El uso de la piedra de construcción ha estado determinado por la proximidad de los recursos geológicos. Los materiales pétreos que históricamente se han utilizado en la Comunidad de Madrid provienen del Sistema Central Español y de la cuenca terciaria de Madrid. El sílex ha sido utilizado desde el siglo IX hasta el XI, cuando fue paulatinamente sustituido por la dolomía de Redueña y el granito, llamado tradicionalmente “piedra berroqueña” (Fort et al., 2013a, b). Los avances tecnológicos del siglo XVIII favorecieron la cantería subterránea de la caliza de Colmenar de Oreja. Sin embargo, la piedra berroqueña extraída a cielo abierto ha proporcionado la mayoría de la piedra de construcción utilizada en Madrid.

La piedra berroqueña ha representado durante siglos la principal actividad económica en muchos pueblos de la Sierra de Guadarrama (Freire-Lista y Fort, 2015a, b). Estas sierras forman parte del Sistema Central Español. Se extienden en dirección suroeste-noreste a través de las provincias de Madrid, Segovia y Ávila. Ocupa un área aproximada de 100 km de largo por 40 km de ancho en donde existen diversas variedades de granito. Esta piedra ha dado origen a un elevado número de construcciones que suponen un importante pilar en el turismo histórico, cultural y rural del que disfruta actualmente la Comunidad de Madrid.

Esta tesis se centra especialmente en los granitos de Alpedrete, Cadalso de los Vidrios, Colmenar Viejo y Zarzalejo que cuentan con gran representación en el patrimonio construido de la Comunidad de Madrid (Freire-Lista et al., 2014a, b, 2015a, b, c). Se ha realizado una profunda búsqueda documental sobre la explotación y el uso de estos granitos, que forman parte de la mayoría de los monumentos, edificios, mobiliario urbano, calles empedradas y de casi toda la arquitectura rural y obra civil de esta Comunidad. Así como de edificios modernos, centros comerciales, ampliación del museo Reina Sofía y del Banco de España, por citar algunos.

Las terminales de los aeropuertos de Atenas y Cork, el consulado británico de Hong Kong y centros comerciales de China son algunos ejemplos de edificios construidos con piedra berroqueña.

Los granitos de Alpedrete y Zarzalejo (Freire-Lista et al., 2015d, e, f) han sido los más utilizados en la arquitectura histórica de la Comunidad de Madrid. Monumentos tan representativos como el Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (siglo XVI), el Palacio Real de Madrid (siglo XVIII), la Puerta de Alcalá (siglo XVIII), la Biblioteca Nacional (siglo XIX) y la Catedral de la Almudena (siglo XX), por citar algunos, están contruidos con estos granitos.

Ha sido realizada una caracterización petrológica de cada uno de estos granitos y una exhaustiva recopilación documental de los antecedentes del estudio del granito a lo largo de la historia.

La durabilidad de la piedra está fuertemente condicionada por su grado de anisotropía, propiedad que determina su calidad y resistencia al deterioro frente a la acción agresiva de agentes meteóricos tales como el agua y la temperatura. Se realizó un estudio de la anisotropía en los nueve tipos de piedras más utilizadas en el patrimonio construido del centro de España. Se han utilizado seis índices de anisotropía para establecer el que mejor define los procesos de deterioro diferencial observado en las piedras de una misma cantera (Fort et al., 2011). La elección apropiada del material de construcción según su calidad, garantiza una mayor resistencia al deterioro y, por lo tanto, aumenta su durabilidad. Los materiales con menor anisotropía y porosidad presentan mayor durabilidad. Por lo que se debe determinar la anisotropía y propiedades petrofísicas de la piedra natural utilizada tanto para restauración del patrimonio arquitectónico como para obra nueva.

Los cuatro granitos mencionados fueron sometidos a 280 ciclos de envejecimiento artificial acelerado por hielo/deshielo, según la norma UNE-EN 12371, 2001/2011 (Freire-Lista et al., 2015b), y a 42 ciclos de choque térmico, según la norma UNE-EN 14066, 2003/2014. Para determinar la respuesta de cada granito ante los envejecimientos acelerados, se realizaron

análisis petrográficos y petrofísicos (utilizando técnicas destructivas y no destructivas) antes, durante y después de los mismos. Con la combinación de estos análisis, se ha determinado la evolución de la microfisuración, diferenciando entre microfisuras inter-, intra- y trans-cristalinas en los distintos minerales de los granitos estudiados. De esta manera, se han identificado las causas y el efecto del deterioro en monumentos y edificios de granito.

La mineralogía, textura y alteración físico-química de los granitos han desempeñado un papel destacado en el deterioro. Los mecanismos de deterioro variaron en los cuatro tipos de granito y para cada ensayo de envejecimiento artificial acelerado. Los resultados petrofísicos, tales como la variación de densidad, porosidad, velocidad de propagación de ondas de ultrasonido, propiedades mecánicas (medidas de forma indirecta) y color han dado fe de la calidad de los cuatro granitos estudiados. El principal deterioro producido por los ensayos de envejecimiento artificial acelerado ha sido la creación de microfisuras y coalescencia de microfisuras preexistentes.

El estudio de las microfisuras generadas en los feldespatos de los granitos de Alpedrete y Zarzalejo durante los ciclos de hielo/deshielo y de choque térmico ha servido para entender el proceso de deterioro. Los feldespatos potásicos y plagioclasas han desarrollado diferentes mecanismos de microfisuración debido a la microestructura: anisotropía cristalográfica, maclas, direcciones de exfoliación y zonados composicionales (Freire-Lista et al., 2015c). La propagación de microfisuras se ha producido predominantemente a partir de microfisuras preexistentes, en el contacto entre minerales y en planos cristalográficos. El zonado composicional de las plagioclasas ha generado microfisuras concéntricas en ambos granitos estudiados.

Para entender el deterioro de sillares y esculturas de granito, se ha estudiado la anisotropía del granito de Alpedrete de acuerdo con sus planos de corte (Freire-Lista y Fort 2015c). Es decir, la ley, o dirección en la que la piedra se divide más fácilmente; la mano buena o dirección de la segunda división más fácil y la mano mala, dirección en la que la piedra es más difícil de dividir. Distintas propiedades petrográficas y petrofísicas han demostrado que el plano de ley

está determinado por las microfisuras de extensión. Los canteros tradicionales han utilizado los planos de anisotropía del granito, orientación de microfisuras de descompresión, para el corte y puesta en obra. El plano definido por la coalescencia de microfisuras de descompresión, ha sido el utilizado preferentemente como paramento en sillares de edificios históricos.

Se ha estudiado la influencia del clima, orientación, labra y microfisuras de descompresión sobre el deterioro del granito en la Plaza Mayor de Madrid (España). Esta plaza rectangular está orientada según los puntos cardinales. Por lo tanto, cada cara de las columnas prismáticas tiene sus propias condiciones microclimáticas. Las microfisuras de descompresión están generalmente orientadas verticalmente. También existen microfisuras debidas a la labra con bujarda que muestran una disminución de densidad y longitud hacia el interior de la columna, es decir, alejándose de la superficie labrada.

Se ha cartografiado el desplazado de las columnas ortoédricas de granito de la Plaza Mayor de Madrid, Este tipo de deterioro es muy común en los sillares de granito labrados de forma tradicional. Se ha medido la altura, distribución y orientación del desplazado. Los desplazados se producen generalmente en la parte inferior de los sillares con un espesor que no suele superar los 4 mm.

Los trabajos llevados a cabo para la puesta en valor de la piedra berroqueña han permitido publicar 3 artículos científicos en revistas internacionales. Uno para la candidatura como “Global Heritage Stone Province” (GHSP) de la región productora de piedra berroqueña y otros dos para las candidaturas de los granitos de Alpedrete y Zarzalejo como “Global Heritage Stone Resource” (GHSR). Esta designación es una iniciativa de la “International Union of Geological Sciences”, del “Heritage Stone Task Group” (HSTG) y la “International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission C-10, Building Stone and Ornamental Rock”

Además se ha publicado un libro divulgativo sobre la historia de los materiales de construcción del barrio de las Letras de Madrid. Este barrio conserva en la mayoría de sus edificios las piedras de construcción tradicional originales, es uno de los barrios más turísticos de Madrid y las piedras de construcción que forman parte de su patrimonio construido son muy susceptibles al deterioro debido a su gran exposición a agentes agresivos. Se han presentado 4 contribuciones en congresos internacionales y se han realizado rutas geomonumentales, creando un puente de comunicación entre distintos actores implicados en la conservación del patrimonio construido como canteros de la Sierra de Madrid, el grupo de Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio de la Universidad Complutense de Madrid, el grupo de Cultural Heritage de la University of Calabria (Italy), el Heritage Stone Task Group, la Comunidad de Madrid y ayuntamientos como el de Perales de Tajuña.

La caracterización del deterioro en estos granitos ha permitido publicar 4 artículos científicos en revistas internacionales. Así como presentar comunicaciones en 5 congresos, internacionales y dos congresos nacionales. Esta tesis ha puesto de relevancia que la anisotropía del granito de Alpedrete está determinada por las microfisuras de descompresión, las cuales suelen ser paralelas a la superficie de la cantera. Los canteros han utilizado las microfisuras de descompresión para el corte tradicional de sillares (dirección “Ley”, o de corte más fácil) ya que el corte en esta dirección es debido a la coalescencia de microfisuras de descompresión que se encuentran en un mismo plano (Nara y Kaneko, 2006). Dicho de otro modo, fracturas coplanarias se juntan generando una superficie. Este plano es preferentemente el elegido para formar el paramento o cara vista de sillares en las fachadas de edificios tradicionales. De esta forma, las microfisuras de descompresión se orientan paralelas al paramento y a la vez, perpendiculares a la superficie del terreno, facilitando el ascenso capilar. El desplazado es uno de los tipos de deterioro más común en la superficie de sillares de granito en la Comunidad de Madrid. Se produce normalmente paralelo a las microfisuras de descompresión.

Con un total de 10 artículos, un libro y 10 contribuciones a congresos, esta tesis aporta desde el campo de la geología datos científicos muy útiles para otras disciplinas como la historia, la arqueología, la restauración, las bellas artes y la arquitectura.

2-OBJETIVOS

La tesis titulada “El granito como piedra de construcción en Madrid: durabilidad y puesta en valor” tiene dos objetivos generales. El primero consiste en establecer la calidad y durabilidad de cuatro granitos muy utilizados en el patrimonio construido de la Comunidad de Madrid; estos son el granito de Alpedrete, Cadalso de los Vidrios, Colmenar Viejo y Zarzalejo. En base a su utilización a lo largo de la historia, a su calidad y a su durabilidad, el segundo objetivo se centra en la puesta en valor de estos granitos mediante un incremento de su difusión.

2.1- Caracterizar la calidad, durabilidad y formas deterioro de la piedra de construcción más utilizada en la Comunidad de Madrid.

La consecución de este objetivo ha sido el hilo conductor del estudio. A medida que se avanzaba ha ido surgiendo la necesidad de profundizar en nuevos aspectos, por lo que se han establecido una serie de sub-objetivos complementarios e interrelacionados:

2.1.1-Establecer la evolución en el uso de las piedras de construcción de Madrid, destacando la importante presencia que tienen los granitos a lo largo de toda la historia constructiva de la Comunidad de Madrid.

2.1.2-Determinar la anisotropía y su influencia en la durabilidad de las piedras de construcción de Madrid. El estudio de esta propiedad petrofísica se centra especialmente en los cuatro granitos objeto de estudio, para determinar su grado de calidad y resistencia a la agresión de agentes de deterioro, fundamentalmente el agua.

2.1.3-Determinar el deterioro inducido por hielo/deshielo en los cuatro granitos señalados. En este sub-objetivo pretende definir el tipo de deterioro asociado al efecto del hielo/deshielo según el tipo y textura de granito madrileño desarrollando técnicas de fractográfico.

2.1.4-Determinar el deterioro inducido por el choque térmico en los cuatro granitos de la Comunidad de Madrid antes mencionados. Se define el tipo de deterioro asociado al efecto

inducido del choque térmico según el tipo y textura de granito. El estudio fractográfico y técnicas petrofísicas permitirán cuantificar los cambios físicos sufridos por estos materiales durante el ensayo.

2.1.5- Caracterizar el deterioro inducido por los ensayos de choque térmico y hielo/deshielo en los feldespatos de los granitos estudiados. Se buscará la respuesta de los minerales de feldespato a la agresión de agentes externos tales como la cristalización del hielo y los contrastes térmicos. Se seleccionan los feldespatos por resultar uno de los componentes mayoritarios de los granitos y presentar de forma natural una mayor alterabilidad química.

2.1.6- Determinar el origen de la anisotropía del granito utilizado en construcción tradicional y caracterizar el deterioro producido por la labra tradicional con bujarda. Se intentará determinar en el granito de Alpedrete el origen de su anisotropía y la influencia de esta en el origen de desplazados, como forma de deterioro más habitual en los zócalos graníticos presentes en el centro de Madrid.

2.2- Puesta en valor del patrimonio material e inmaterial que ha generado el granito de la Sierra de Madrid (Piedra Berroqueña).

Para este segundo objetivo se han definido tres escalas: internacional, autonómica y local, estableciéndose siete sub-objetivos:

2.2.1- Dotar a la región donde se extrae la Piedra Berroqueña la designación internacional de Global Heritage Stone Province (GHSP). Esta designación para toda la piedra berroqueña se solicitará a la *International Union of Geological Sciences* (IUGS) pues constituye un reconocimiento a aquellas regiones que cuentan con un amplio potencial de producción y exportación a nivel mundial de la piedra de construcción utilizada en su patrimonio.

2.2.2- Dotar al granito de Alpedrete de la designación internacional GHSP. De forma específica y por ser uno de los granitos más usados a lo largo de toda la historia constructiva madrileña, se propondrá a la IUGS designar al granito de Alpedrete como *Global Heritage Stone Resource*.

2.2.3-Dotar al granito de Zarzalejo de la designación internacional GHSR. Como en el caso anterior, también se propondrá al granito de Zarzalejo para la consecución del título de *Global Heritage Stone Resource*, por ser un granito muy usado tanto en el pasado como en la actualidad, y contar con suficientes recursos para su internacionalización.

2.2.4-Divulgar las piedras de construcción que configuran el patrimonio arquitectónico madrileño. La difusión social es una herramienta importante para dar a conocer el legado arquitectónico y artístico con que cuenta la Comunidad de Madrid y su capital y poder así facilitar su protección y conservación futura. Un ejemplo claro va a ser la puesta en valor de los materiales de construcción tradicional del Barrio de las Letras de Madrid a través de un libro divulgativo que se editará en 2016, y en el que esta tesis va a participar con un capítulo dedicado íntegramente a los materiales de construcción, ocupando los granitos estudiados un puesto privilegiado.

3-INTRODUCCIÓN

La mayoría de los edificios más representativos de Madrid están contruidos, total o parcialmente, con granito de la Sierra de Guadarrama. Esta piedra de construcción también forma parte de su mobiliario urbano como esculturas, bancos, aceras, registros de alcantarillas, adoquines, mojones, fuentes, bolardos, escaleras y bolas herrerianas, entre otros muchos elementos que constituyen el paisaje urbano de las ciudades y pueblos de Madrid. Cada uno de los sillares, columnas y demás elementos estructurales y ornamentales han sido labrados artesanalmente y han sido transportados hasta su ubicación actual en carros tirados por bueyes hasta bien entrado el siglo XX. Del mismo modo, han sido cuidadosamente colocados para construir un legado que es uno de los recursos culturales y económicos de mayor importancia de España.

Si observamos estos sillares individualmente, veremos la huella de canteros; alguna vez borrada por siglos de exposición a la intemperie, que produce un deterioro lento, gradual e inexorable. Otras veces, veremos un mayor deterioro debido a problemas estructurales, constructivos y la mayoría de las veces, a episodios antrópicos, como conflictos bélicos, actos terroristas, turismo masificado, vandalismo, perforaciones para rótulos o cableado, contaminación (La Russa et al., 2013), aplicación de técnicas agresivas de limpieza o conservación (Perez-Ema, 2013). La pérdida de los matices que los canteros y escultores han querido plasmar al dar volumen y forma al granito es de capital importancia y la mayoría de las veces se podría prevenir.

Para mitigar el deterioro de nuestro patrimonio construido, primero se deben caracterizar las piedras que lo constituyen para así valorar su grado de calidad, identificar las canteras de origen y las técnicas de extracción y labra. Después se deben estudiar las causas y mecanismos que producen ese deterioro, medir sus efectos, magnitud, gravedad y frecuencia (Viles et al., 1997; Doehne y Price, 2010) para así entenderlos, valorar la durabilidad de las piedras y darles solución.

La tesis titulada “El granito como piedra de construcción en Madrid: durabilidad y puesta en valor” se puede dividir en dos partes, una versa sobre el carácter patrimonial (material e inmaterial) del granito de la Sierra de Madrid, estudiando los orígenes y evolución de su uso como material de construcción a lo largo de la historia., es decir, su puesta en valor. La otra parte de la tesis se centra en la calidad y durabilidad del granito como piedra de construcción. Cuatro granitos de la Sierra de Madrid han sido sometidos a ensayos acelerados de hielo/deshielo y choque térmico. El deterioro de estas probetas y de otros sillares históricos se ha evaluado con técnicas y ensayos petrográficos y petrofísicos, destructivos y no destructivos. Por último, se ha profundizado en el origen del desplazado de sillares de granito, uno de los tipos de deterioro más común en los granitos de construcción de Madrid.

3.1- La piedra berroqueña como material de construcción en Madrid

La piedra de construcción, además de su gran importancia económica e industrial, tiene un valor cultural e histórico al formar parte del patrimonio construido (Kovács, 2009). España, con unas exportaciones de piedra de construcción por valor de 927 millones de euros en 2014, es un referente a nivel mundial en este sector (ICEX-Instituto Español de Comercio Exterior, 2014). Su mecanización y exportación se inicia en los años 60 del siglo XX, coincidiendo con el crecimiento económico y desarrollo tecnológico, tanto en las canteras como en las plantas de procesado (Martínez Falero). La producción, elaboración y comercialización de la piedra de construcción ha crecido ininterrumpidamente desde los años 80 del siglo XX hasta el año 2008, cuando comenzó una crisis económica que afectó intensamente al sector. En 2009, el sector empleó en España a unas 24.300 personas (Federación Española de la Piedra Natural).

El granito ha sido muy utilizado desde la antigüedad y continúa siendo una importante piedra de construcción debido a su abundancia y durabilidad (Vázquez, 2010; Siegesmund y Snethlage, 2014). Representa el 20,8 % del volumen total de roca ornamental exportada desde España. Las zonas productoras más importantes son Galicia, Madrid, Extremadura y Ávila.

El granito de la Comunidad de Madrid proviene de la Sierra de Guadarrama, situada en la franja noroeste del territorio de la Comunidad de Madrid y formando parte del Sistema Central Español. Ocupan un área aproximada de 100 km de largo por 40 km de ancho, en las provincias de Madrid, Segovia y Ávila. Se originaron durante la Orogenia Varisca, en el Carbonífero (Villaseca et al., 1993, 1998, 2009, 2012; Villaseca y Herreros, 2000) y engloba diversas variedades de granito, que se explotan en canteras a cielo abierto. Este granito tiene una producción que ocupa un importante puesto en relación a las otras zonas de España. El 20-30 % del granito de Madrid se utiliza actualmente en la elaboración de árido de machaqueo destinado a la construcción nacional y el 80-70 % se utiliza como roca ornamental, destinado al comercio nacional e internacional, exportándose principalmente como bloques, que una vez procesados se utilizan en edificios de importantes ciudades del mundo.

Las explotaciones de la Comunidad de Madrid se pueden dividir en la zona Norte, con canteras en localidades como Valdemanco, Bustarviejo, La Cabrera (Casquet et al., 2004), Lozoyuela y El Berrueco. Esta zona se convirtió en una de las más importantes de la Comunidad en cuanto al tamaño y producción de sus canteras en la década de los 80 del siglo XX. Explotaciones modernas, muy tecnificadas y de gran tamaño, producen bloques para la exportación y para el mercado interior. Sus variedades comerciales son conocidas como Blanco Castilla, Blanco Cabrera, Blanco Berrocal, Crema Champán y Blanco Aurora.

En la zona Noroeste, las localidades de El Escorial, Zarzalejo, Becerril de la Sierra, Moralarzal, Alpedrete, Collado, Mataelpino, El Boalo, Cerceda y El Berrocal cuentan con explotaciones históricas de pequeño tamaño y poco tecnificadas. Producen piedra de cantería para el mercado local de la propia Comunidad. En Zarzalejo existe actualmente una explotación mediana tecnificada que produce bloques con el nombre de Blanco Rafaela. En la zona Suroeste, la localidad de Cadalso de los Vidrios es, junto con la zona norte, el área más importante de la Comunidad de Madrid en cuanto al volumen de piedra berroqueña extraído. A partir del año 1986 comienza la producción de granito en grandes explotaciones altamente tecnificadas. Sus variedades comerciales son Blanco Cristal, Blanco Cadalso, Fino Cristal y Gris Cadalso. En las zonas de Colmenar Viejo, Navalagamella y Chapinería, existen grandes canteras de granito para la producción de árido de machaqueo, no usándose actualmente para la producción de granito ornamental.

Tradicionalmente este granito se ha designado en la zona centro-oeste de España como piedra berroqueña (Núñez de Toledo y Guzmán, 1555; Ponz, 1781; Espinosa, 1859), donde el término "piedra" se refiere a rocas utilizadas por el hombre (Winkler, 1997) y el término "Berrueco" designa peñasco granítico (Llorente, 2011).

3.2-El legado del granito de construcción

Marcos y Bausa, 1879 indica que la sostenibilidad de una construcción se obtiene empleando piedras cercanas. Aunque en algunos casos, es necesaria la importación pues se requieren unas características distintas a las de las piedras de construcción locales. La selección de las piedras más adecuadas para cada emplazamiento ha sido posible gracias a los siglos de experiencia en construcción tradicional con materiales cercanos. Esta cuestión ha definido el paisaje urbano de las ciudades en todo el mundo, ya que las piedras de construcción utilizadas en las ciudades otorgan identidad propia a los edificios históricos contruidos con ellas. La cercanía de las canteras de piedra berroqueña ha permitido que esta piedra forme parte del paisaje rural de pueblos de la Sierra de Guadarrama y del paisaje urbano de las ciudades de la Comunidad de Madrid.

La conservación y restauración del patrimonio construido tiene una gran repercusión en la economía de un país y su puesta en valor (Pérez-Monserrat et al., 2013) es una inversión en imagen exterior, turismo y cultura. Por lo que la conservación de la piedra y del patrimonio construido debe ser tratada de forma interdisciplinar (Veniale, et al., 2008; Kühnel, 2002). Geólogos, químicos, restauradores, conservadores, ingenieros, arquitectos, arqueólogos, historiadores, escultores, técnicos de turismo, administraciones, propietarios y sociedad en general tienen la responsabilidad de preservar el patrimonio construido para las generaciones futuras siguiendo unos criterios comunes.

El artículo 34.1 de la Ley 14/2011, de 1 de junio, de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación prevé que los agentes públicos puedan celebrar convenios entre sí, o con agentes privados que realicen actividades de investigación científica y técnica. Ya sean nacionales, supranacionales o internacionales, para la realización conjunta de actividades tales como proyectos y actuaciones de investigación científica, desarrollo e innovación; divulgación y tecnológica y uso compartido de inmuebles, instalaciones y medios materiales. Por otra parte, la Ley 7/1985 de 2 de abril, reguladora de las Bases de Régimen Local, atribuye en su artículo 25.2 e) a los municipios competencias, en los términos de la legislación del Estado y de las Comunidades Autónomas, en

las materias de patrimonio histórico-artístico, a la vez, el artículo 28 de la misma norma, les reconoce la posibilidad de realizar actividades complementarias propias de otras Administraciones Públicas en materia de educación, cultura y la protección del medio ambiente.

Estas leyes establecen las bases legales para la creación de estrategias integradoras de protección y gestión sostenible en materia de conservación del patrimonio construido. Es decir, sistemas coordinados de actuación para que el patrimonio sea un eje principal de desarrollo en entidades locales. La puesta en valor del patrimonio material e inmaterial, como monumentos, espacios arqueológicos, etnográficos, canteras históricas, mobiliario urbano tradicional o formas de corte y talla tradicionales debe basarse en inventarios, registros y material científico que ha de formar parte de reservorios comunes. Los planes de gestión del patrimonio construido deben primar la coordinación y dirección frente a la intervención, centrándose en la conservación preventiva. La utilización de técnicas analíticas no destructivas (Álvarez de Buergo y González, 1994, 2004; Vasconcelos et al., 2007, 2012) y la evaluación previa de la eficacia de cualquier tratamiento e intervención (Ruiz de Argandoña, 2009) permite el seguimiento y el desarrollo sostenible de la conservación preventiva. La participación ciudadana en este sentido es fundamental y se debe promover la realización de actividades de difusión (Perez-Monserrat et al., 2013).

Esta tesis se basa en el estudio de la historia de uso y propiedades petrofísicas y de durabilidad de los granitos de Alpedrete, Cadalso de los Vidrios, Colmenar Viejo y Zarzalejo. Todos ellos ampliamente utilizados en el patrimonio construido de la Comunidad de Madrid (Freire-Lista y Fort, 2015a, b). El granito de Alpedrete ha sido muy usado en la ciudad de Madrid (Anexo Ia). En el artículo dedicado a este granito se profundiza en el patrimonio material e inmaterial que ha generado y se da un listado de monumentos en donde se ha utilizado (Freire-Lista y Fort, 2015a). En Cadalso de los Vidrios existe gran cantidad de pequeñas canteras históricas, sin embargo su producción histórica era de carácter local, debido a que su población se ha dedicado a la producción de vidrio (Marqués de la Ensenada, 1752) (Anexo Ib). El uso de este granito se remonta a tiempos paleolíticos, existe un yacimiento arqueológico mudéjar (Benito-López,

1996a,b,c; Crespo Fernández, 2011) y edificios de los siglos XV y XVI. En Freire-Lista y Fort, 2015b se profundiza en el patrimonio material e inmaterial que ha generado En cuanto a la utilización del granito de Colmenar Viejo, también hay vestigios antiguos (Miñano, 1829; López Sáez, 2015). Se conoce un pequeño tramo de calzada romana, construida con los granitos sobre los que se asienta, enterramientos del siglo VII y la basílica parroquial de la Asunción (siglos XV y XVI) (Menduiña y Fort, 2005). Además de los diques porfídicos de esta localidad, el granito de Colmenar Viejo ha sido muy utilizado como adoquines en la pavimentación de Madrid (García del Cura, et al., 2008) (Anexo II).

El granito de Zarzalejo ha sido utilizado como piedra de construcción desde la Edad de Bronce, conservándose una calzada romana. Existen números restos de canteras históricas (Anexo Id). En el capítulo dedicado a él se profundiza en el importante y amplio patrimonio construido y restaurado con este granito, así como su patrimonio inmaterial generado (Freire-Lista et al, 2015 e, f).

La importancia de edificios históricos contruidos con piedra berroqueña y las exportaciones internacionales de estos granitos hacen necesaria su puesta en valor, a través de la caracterización de sus propiedades petrofísicas y del estudio de su deterioro, ya que puede influir en la pérdida del importante patrimonio construido de la Comunidad de Madrid.

3.3-Antecedentes sobre el estudio de las piedras de construcción

Aunque no ha quedado registro escrito, las piedras han sido motivo de análisis desde que el ser humano ha buscado los mejores abrigos para resguardarse de las inclemencias meteorológicas y más tarde, construir viviendas y megalitos que perdurasen en el tiempo. Gracias a este interés por encontrar las piedras de mejor calidad, han prevalecido hasta nuestros días canteras prehistóricas (Harrell y Storemyr, 2009; De Laet et al., 2015), cuyas piedras han sido transportadas a largas distancias por poseer características específicas.

Las primeras menciones escritas que se conservan sobre piedra de construcción y deterioro las realizó el filósofo griego Teofrasto (372-287 a. C.) en la obra “Peri liton” (Earle Radcliffe y John, 1956) en donde describe muchas de las piedras utilizadas en la Grecia clásica para la construcción de sus edificios. El arquitecto romano Marco Vitruvio Pollione (80 a. C. -15 a. C.) describe canteras y materiales de construcción, abordando su durabilidad en su obra "Los diez libros de Arquitectura" (Oliver Domingo, 1997). Más tarde, Cayo Plinio II (23-79 d.C.) (Jiménez González, 2008) deja de manifiesto la demanda de piedras de construcción de distintos colores y buena calidad que demandaba el imperio romano en “La Historia Natural” y el buen hacer de los Collegia fabrorum, que eran las agrupaciones de canteros, obreros, maestros y arquitectos romanos que habían obtenido sus conocimientos sobre la forma de trabajar la piedra y sus propiedades de los arquitectos griegos, que a su vez la habían recibido de los arquitectos del antiguo Egipto (Jacq, 1975). Después de la caída del Imperio Romano, caen en desuso muchas técnicas empleadas con las piedras de construcción. La piedra se clasificaba según el uso que se le daría en tres tipos: Lapis vivus o franchus, piedras duras para obras de calidad y esculturas; lapis villanus, piedra blanda para construcciones de inferior calidad; lapis maceralis, cantos para mampostería y relleno interior de los muros y lapis columnarios piedra de gran resistencia para la construcción de los pilares.

En la Hispania céltica (Berrocal-Rangel y Moret, 2007), la piedra era un elemento fundamental de construcción en las fortificaciones con murallas de mampuestos, de cajones (Camino Mayor, 2000), vitrificadas y campos de piedras hincadas propias de pueblos o castros con abundancia de piedra que utilizan, de forma sincrónica, mampuestos y sillares extraídos de canteras próximas a las fortificaciones o de sus fosos.

Los primeros poblados amurallados de la Edad de Hierro Antiguo eran superficies cercadas por anchos muros de mampostería y adobe. Las murallas vitrificadas peninsulares estaban realizadas con mampuestos y adobes cocidos (Berrocal-Rangel, 2004) compuestos fundamentalmente de huesos, basura, musgo seco y turba que servían para compactar la mampostería colocada a seco con un amplio rango cronológico desde la Edad del Bronce final (siglos VII-VI a. C.) al del Hierro final (siglo II a. C.), en estrecho paralelismo con las barreras de piedras hincadas.

Existen murallas de cajones, casernas y módulos en emplekton, es decir, la combinación de materiales heterogéneos, morteros y piedras irregulares de relleno del espacio entre las dos caras de una pared vertical, en el siglo IV a. C. Estas murallas con fosos frente a las entradas, bastiones cuadrangulares y posiblemente torres definirían una poliorcética celtibérica tardía con cierta complejidad y calidad constructiva con muros con sillares perfectamente escuadrados (Burillo, 2003) del siglo II a. C. El uso de sillares es frecuente en poblados y citanias a mediados del siglo I d. C.

Molinos y demás utensilios de piedra encontrados en estos yacimientos están elaborados normalmente con piedras de calidad adecuada al uso que se le daba. Lo que atestigua un conocimiento de la calidad y propiedades de distintas piedras. Gracias a los estudios de los materiales líticos, es posible comprender la cultura de los primeros pobladores.

La Vía de la Plata ha sido uno de los caminos de expansión de los conocimientos fenicios en materia de piedras de construcción y técnicas de labra, durante toda la Prehistoria Reciente y, especialmente, durante la Edad del Hierro. La romanización trajo consigo un gran desarrollo de

la piedra de construcción para la construcción de ciudades, murallas, villas, infraestructuras- puentes, acueductos y presas- y motivos ornamentales (Fernández Suárez, 2013).

En el siglo XI comienzan a reedificarse antiguas iglesias de “noble e rica fábrica” por toda Europa para edificar magníficas catedrales (Sobrino, 2002, 2009) que requerían de los mejores materiales de construcción disponibles en sus proximidades. Los maestros de obra llevaban el control de la calidad de la piedra y eran los encargados de la construcción. Algunos de ellos eran verdaderos expertos internacionales y su reconocimiento se extendía por toda Europa (Watson, 1990) Transmitiendo sus conocimientos de forma oral al gremio. Como el caso del Maestro Fruchel, de procedencia francesa, que trabajó en la construcción de catedrales románicas en España y que un documento fechado en 1192 lo define como *magister operis in cathedralis* (Benito Pradillo, 2011).

El intelectual persa Abu Rayhan al-Biruni (973-1048) describió las propiedades petrofísicas de 100 minerales conocidos, desarrollando el método de pesada hidrostática para el cálculo de densidad (Shuriye y Danzomo, 2011). A principios del siglo XII se funda la escuela de traductores de Toledo, a partir de entonces se tradujeron importantes obras escritas en árabe al latín. Este hecho será esencial para el desarrollo del gótico.

Avanzado el siglo XIII, comienzan a aparecer obras escritas en el lenguaje de los maestros de obra, (no en latín). Entre los primeros conocidos encontramos la obra anónima *Practike Geometrie* que incluye cuestiones de agrimensura y astronomía. La obra más conocida es el Cuaderno de Villard de Honnecourt, maestro cantero del siglo XIII, donde aparece un conjunto de dibujos, textos y enseñanzas sobre las piedras de construcción.

La complejidad de los edificios góticos ha sido un propulsor del estudio de las piedras de construcción. El italiano León Battista Alberti restauró las iglesias de Santa María la Mayor y Santo Stefano Rotondo en Roma durante el papado de Nicolás V (1447-1455). Durante este período, escribe “De re ædificatoria” (Rivera, 1992), tratado sobre los aspectos teóricos y

prácticos de la arquitectura, basado en la obra de Vitrubio y dedicando el segundo tomo a los materiales de construcción.

En 1453 con la caída de Constantinopla por el ataque turco marca el uso generalizado de la artillería, cuestión que influyó en el estudio de los materiales de construcción de las fortificaciones militares (Cruz Freire, 2013). Las poblaciones habían crecido al amparo de viejos castillos medievales contruidos para resistir un ataque con lanzas y proyectiles no impulsados con pólvora, por lo que eran vulnerables y necesitaban reforzar sus murallas con piedras de gran resistencia. A raíz de la invasión de Nápoles por las tropas francesas armadas con artillería en 1492, nace la ingeniería militar como una profesión distinta de la de la arquitectura civil. En Italia se produce una intensa actividad constructiva y un gran número de publicaciones sobre materiales de construcción, arquitectura y urbanismo militar.

El escultor y arquitecto Francesco di Giorgio Martini (1439-1502) escribe “Trattato di Architettura, Ingegneria e arte militare”. Sólo en Italia, entre 1554 y 1599, fueron publicados casi una veintena de tratados (Hale y Han, 1977). Pietro Cataneo “1 quattro primi libri d’architettura”, Venezia, 1554, Maggi, Castriotto, Lanteri, March, Speckle, Eliano, Alghisi, Busca y Tetti son algunos de los principales tratadistas. Junto con las obras de Michele Sanmicheli y de Antonio da Sangallo il Giovane, Vincenzo Scamozzi (Dell’idea dell’architettura universale, Venezia, 1615) se evidencia un amplio conocimiento de los materiales de construcción. La edificación de fuertes en toda Europa requería del conocimiento de canteras, propiedades de las piedras de construcción, estructuras además de aritmética, trigonometría, geometría y el uso de instrumentos matemáticos (Galindo Díaz., 1996). Esta arquitectura atendía preferentemente a las necesidades militares y a la economía de medios.

La Academia Real Mathematica, fundada por Felipe II en 1582 en Madrid, bajo la dirección del arquitecto Juan de Herrera, impartió docencia de arquitectura civil y militar. Además de matemáticas, los materiales de construcción eran importantes. A la muerte de Herrera pasó a ser dirigida por Francisco de Mora y, desde 1615 por su sobrino, el también arquitecto, Juan Gómez de Mora.

El ingeniero militar Cristóbal de Rojas impartió clases en esta institución, su obra “Teoría y Práctica de la Fortificación” (1598) fue el primer tratado sobre fortificaciones que se publicó en España. Describe cómo debían ser las fábricas, murallas, pilares, columnas y las demás elementos de una fortificación (Capel Sáez et al., 1988). Trata en la tercera parte del conocimiento de los materiales y de sus mezclas (cap. 1-111); consejos para ahorrar gastos en las obras de fortificación (cap. IV); reglas sobre las distintas clases de cimientos (cap. V-VII). Su aparición coincidió con una época de intensa actividad constructora en España y en Europa (Fortificaciones de Cádiz, Gibraltar, Jaca, Pamplona). El mismo intervino en obras de reconstrucción y fortificación de la ciudad de Cádiz en 1596 sucediendo a los ingenieros italianos Calvi, Frantin, y Espanochi y de la que perduran el Castillo de Santa Catalina (hacia 1598), la reconstrucción de la Iglesia de Santa Cruz también en Cádiz. En la obra “Breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes” que Diego López de Arenas escribe en 1633 se elogia la buena fábrica elegida por Cristóbal de Rojas.

En 1599, un año posterior al tratado de Rojas, aparece impreso el Examen de Fortificación que hace un Príncipe a un ingeniero, para poner en defensa sus estados, escrito por Diego González de Medina Barba en forma de diálogo dirigido al rey Felipe III en donde habla del conocimiento de materiales y reglas para la cimentación (folio 130) (Carvajal, 1985).

En la Academia Real Mathematica enseñaron, además de los directores y profesores antes citados, destacadas figuras científicas como el geógrafo Juan Bautista Labaña, los ingenieros Tiburcio Spanocchi, y Pedro Rodríguez de Muñiz. La Academia fue absorbida por el Colegio Imperial de los Jesuitas en 1625. En donde se estudiaba historia natural, «para leer de las partes y de la Historia de los Animales, Plantas y Aves, y de la naturaleza de las piedras y Minerales» (Simón Díaz, 1952). El Colegio Imperial se convirtió en el centro esencial de estudios superiores de arquitectura e ingeniería en la España del siglo XVII (Capel Sáez et al., 1988; Valverde, 2012; De Lucca, 2012). Gracias a esta institución se conserva un amplio patrimonio de fortificaciones en España y América (Morillas, 2015).

Regresando al ámbito de arquitectura civil, el español Diego de Sagredo escribe *Las Medidas del Romano*, el primer libro sobre arquitectura y materiales de construcción impreso en español en 1526 y el primer texto original publicado sobre el tema fuera de Italia durante el Renacimiento. También fue el primer libro que llegó a los Estados Unidos sobre arquitectura. Este libro fue traducido al francés hacia 1536 y en 1539, publicado en castellano en Portugal en 1541 y 1542 (tres ediciones en total), en Toledo en 1549 y 1564, y de nuevo en París en 1542, 1550, 1555 y, finalmente, en 1608 (Anexo VI). El italiano Sebastiano Serlio Boloñes, escribe en 1552 el “Tercero y Cuarto Libro de Architectura” en donde clasifica la piedra de construcción como buena, tosca, franca, dura y fina, también menciona algunas canteras de origen. La construcción del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial (entre 1563 y 1584) ha constituido un hito en la exploración y evaluación de piedras de construcción españolas en el siglo XVI. Para su ornamentación se utilizaron mármoles españoles, como da fe la inscripción “totum hispano e lapide” de su tabernáculo y para su techado, Felipe II contrató en 1559 a expertos flamencos y franceses que localizaron canteras de pizarra (Cano de Gardoqui García, 1991) utilizadas en su techado. En 1588 se creó en Florencia (Italia) un taller denominado “Opificio delle Pietre Dure” dedicado al desarrollo de la técnica bizantina “commesso”, similar a los mosaicos, consiste en la incrustación de delgadas placas de piedras seleccionados por su color, opacidad, brillo y grano para crear elaborados efectos decorativos como los de la Cappella dei Principi (1602) en la Basílica de San Lorenzo de Florencia. Otro nuevo impulso en el estudio de las piedras de construcción españolas se produce con la construcción del Palacio Real de Madrid (1738-1764) comenzada por Felipe V, a su muerte, Fernando VI, comisiona al irlandés Guillermo Bowles, la exploración de canteras y el control de la calidad de las piedras destinadas para la ornamentación del palacio (Tárraga Baldó, 2009).

Carlos VII de Nápoles (1734-1759), el futuro Carlos III de España (1759-1788) patrocinó y siguió de cerca diversos estudios en el extenso territorio de la Corona Española de la época. A él se debe el descubrimiento y las primeras excavaciones arqueológicas. En 1738 permite al ingeniero aragonés Roque Joaquín de Alcubierre comenzar la exploración de Herculano, y de

Pompeya en 1748. En 1751 crea un museo en la Villa Real de Portici y en 1755 crea la Regale Accademia Ercolanense, ambos en Nápoles, donde especialistas en restauración de mármoles, bronce y papiros estudiaban las piezas descubiertas (Almagro-Gorbea y Maier, 2012). En 1753 comenzaron a publicarse los ocho tomos de la obra “Le antichità di Ercolano esposte” (La antigüedad de Herculano expuesta), que reproducían grabados de las piezas recuperadas, así como planos y diseños de los edificios que iban saliendo a la luz.

En 1761 Carlos III, ya en España, contrata a expertos Italianos para continuar con la exploración de canteras de piedras ornamentales para el palacio Real de Madrid. Sus informes, con mayor cierto rigor científico, indican que se primaba el color, rareza, calidad y abundancia de las piedras, así como la distancia de las canteras a Madrid (Tárraga Baldó, 2009). Carlos III aprueba la "Instrucción para el nuevo empedrado y limpieza de las calles de Madrid, en que se contiene substancialmente el Proyecto de Don Francisco Sabatini". En esta instrucción (Anexo IV), el arquitecto italiano proyecta pavimentar de forma experimental la Calle Carrera de San Jerónimo de Madrid, una mitad se pavimentaría con cantos rodados de cuarcitas, material con el que se pavimentaban las calles de Madrid en la época, y la otra mitad con losas de piedra berroqueña, al modo de las losas de basalto utilizadas en Nápoles. De esta forma, se compararía la durabilidad y coste de mantenimiento de ambos materiales (Anexo IV). Lo que representa los primeros ensayos de durabilidad y calidad de materiales de construcción en España.

Carlos III también patrocina estudios sobre verracos, esculturas zoomorfas realizadas en granito en torno al siglo V a. C. (Nortes Nolasco, 2010), antigüedades fenicias en Málaga, la Sinagoga del Tránsito de Toledo y edificios árabes (Almagro-Gorbea y Maier, 2012). También inicia el primer programa arqueológico llevado a cabo en México, la excavación de la ciudad de Palenque (Cabello, 1993; Navarrete Cáceres, 2000). Por esta época también se construyen numerosos fuertes en América y el español Carlos Beranguer destinado en Chile y Perú publica en 1774 “Relación que comprehende generalmente la situación y consistencia de la Ysla de Chiloé”, señalando la falta de mano de obra capacitada para su extracción.

La Real Academia de San Fernando organizó una expedición, integrada por los arquitectos José de Hermosilla, Juan de Villanueva y Pedro Arnal, para documentar y estudiar la Alhambra de Granada y la Mezquita de Córdoba en 1766. Carlos III encargó a Juan de Villanueva la construcción del Real Gabinete de Historia Natural (hoy museo del Prado) en piedra berroqueña, fundado en 1771 que albergaría una importante colección de lapidarios de toda la geografía española.

Estos avances científicos contribuyeron a incluir a España e Italia en el viaje de formación “*Grand Tour*” de las élites del norte de Europa en la segunda mitad del siglo XVIII, lo que fomentaría el interés por la investigación en las construcciones antiguas y sus piedras de construcción. Las publicaciones de Bromley, 1702; Álvarez de Colmenar, 1707; Fernández de Moratín, siglo XVIII; Carter, 1772; Twiss, 1775; Swinburne, 1779; Margarot, 1780; Ponz, 1781; Dillon, 1782; John Talbot, 1782; Townsend, 1791; Fleuriot, 1796; Jean-Marie-Jérôme, 1796; Young, 1860, son algunos ejemplos. La lectura de estos documentos históricos permite obtener importantes datos de piedras de construcción y localización de canteras históricas (Anexo V).

A finales del siglo XVIII y principios del XIX científicos de diversas áreas, como los arquitectos franceses Jean-Baptiste Rondelet (1743-1829) y Léon Vaudoyer (1803-1873) calcularon respectivamente la resistencia mecánica y la absorción de agua de las piedras de construcción más utilizadas. Entre 1816 y 1845, el naturalista francés Georges Cuvier publicó 61 volúmenes del “*Dictionnaire des Sciences Naturelles*” con importantes aportaciones en materiales de construcción, como la descripción de la elaboración de ladrillos (Tomo II). El ingeniero de minas francés Louis-Étienne Héricart de Thury, 1828 desarrolló ensayos de durabilidad frente a heladas en 1828 y el químico francés Louis Jacques Thénard (1777-1857) realizó un ensayo de durabilidad en un bajo relieve de yeso para el estudio de su disolución (Espinosa, 1859). En 1802 se publica el *Diccionario de Arquitectura Civil* escrita por el español Benito Bails en donde se hace mención de la piedra de construcción. El geólogo inglés William Smith formó parte de una comisión para seleccionar sillares de reemplazamiento en la

restauración del palacio de Westminster de Londres en 1838 (Gómez-Heras, 2005) donde la durabilidad del material jugó un papel fundamental en la elección de las piedras.

En el libro que Espinosa escribió en 1859 se describe un ensayo para evaluar la calidad de piedras de construcción y que se realizaba previamente a la apertura de nuevas canteras. En 1860, el geólogo estadounidense David T. Ansted publica “On the Decay and Preservation of Building Materials”, indicando que todas las piedras están alteradas o meteorizadas en la parte superior de las canteras o cerca de la superficie del terreno. En esta obra se describe la buena calidad y gran durabilidad del granito como piedra de construcción y da las primeras aportaciones sobre la alteración de los feldespatos potásicos de los mismos.-En 1883 el geólogo estadounidense George Perkins Merrill, a quien se le encargaría la selección de la piedra para el monumento a Lincoln, publicó “On the collection of Maine building stones in the United States National Museum”. En ese año, el italiano Camilo Boito, escribió la primera carta de restauración en el Tercer Congreso de Ingenieros y Arquitectos Italianos y por esta época, el instituto “Opificio delle Pietre Dure” dejó la producción de obras de arte y comenzó el estudio de la restauración de piedras. En 1884 el geólogo estadounidense Alexis A. Julien escribió “The durability of building stones in New York City and vicinity”.

En 1862 el geólogo español Casiano del Prado publicó un estudio geológico de la provincia de Madrid, con alguna referencia a canteras de piedra de construcción y en 1876 el ingeniero de minas Felipe Martín Donay, perteneciente a la comisión del Mapa Geológico de España, lo amplió con la descripción de la provincia de Ávila, quedando así el territorio que ocupa esta tesis descrita. Aunque con escasas referencias a la piedra de construcción. La Sociedad Española de Historia Natural, (SEHN), se constituye en 1871 con carácter privado para fomentar la investigación, difusión y defensa del patrimonio natural. Desde 1872 ha editado publicaciones científicas: Anales de la Sociedad Española de Historia Natural entre 1872 y 1900; el Boletín de la SEHN, que en 1903 pasó a denominarse Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (RSEHN); ese año de 1903 comenzó la publicación de las Memorias de la RSEHN y en 1926 comenzó la edición de las Conferencias y Reseñas de la Real Sociedad en donde se han

publicado artículos científicos referidos al tema que nos ocupa (Hernández-Pacheco y Esteban, 1920, 1930).

El profesor de ingeniería civil de la Universidad de Illinois Ira O. Baker publicó “A treatise on masonry construction” en 1890, donde la durabilidad de los materiales de construcción ocupa un lugar destacado. George Perkins Merrill publicó una obra de importancia capital en el estudio de la durabilidad de los materiales de construcción, “Stones for building and decoration” en 1891 y en 1896 un importante artículo sobre los principios del deterioro “Principles of Rock Weathering”, al siguiente año publicó “Rocks, Rock Weathering and Soils”. El geólogo alemán Hirschwald Julius participó en la comisión para la determinación de un método para el estudio de la resistencia de rocas frente a fenómenos atmosféricos en 1893 y a finales del siglo XIX en Estados Unidos de América, el geólogo George W. Hawes inició una magnífica colección de piedras de construcción para el National Museum de Washington D.C, (hoy National Museum of Natural History de la Smithsonian Institution), en donde se realizaban estudios petrológicos y petrofísicos. También en los Estados Unidos de América, en 1901 se funda el “National Bureau of Standards” (NBS) en donde se comenzó el estudio de piedras de construcción en 1912, publicando gran cantidad de artículos científicos en “Technological Papers.” El geólogo estadounidense Gerald Francis Loughlin, realizó su tesis en piedras de construcción de Boston en 1903 y un año más tarde, publicó, junto con su colega Crosby un artículo sobre el tema (Crosby y Loughlin, 1904)

Hirschwald Julius definió un coeficiente basado en la cinética de saturación de las piedras para la evaluación de su resistencia a las heladas en 1908. Ese mismo año, el geólogo estadounidense, T. Nelson Dale publicó una importante obra sobre el granito de construcción de Massachusetts, New Hampshire y la isla Rhode y el geólogo inglés John Allen Howe publicó “The geology of building stones” en 1910 y en 1920 “Stones and quarries”. Hirschwald Julius publicó una guía de ensayos de laboratorio de materiales de construcción destinado a ingenieros, arquitectos y canteros en 1912. En ese mismo año, el geólogo estadounidense Edwin Clarence Eckel publicó “Building stones and clays”.

El italiano Gustavo Giovannone propuso la “Teoría de la Restauración” en 1912. En 1914 el geólogo español Eduardo Hernández-Pacheco y Esteban publica “Las pinturas prehistóricas de Peña Tu (Asturias)”, Este geólogo profundizará a lo largo de su dilatada carrera en el estudio del patrimonio prehistórico y monumentos naturales (Hernández-Pacheco y Esteban, 1944, 1952, 1955, 1956, 1959). El estadounidense D.W. Kessler, del Bureau of Standards publicó un tratado sobre ensayos físicos y químicos en materiales de construcción en 1919 y las propiedades físicas de las principales calizas comerciales utilizadas para la construcción de edificios en los Estados Unidos de América en 1927 (Currier, 1960). El antes citado T. Nelson Dale publicó otra obra sobre el granito de construcción de Nueva Inglaterra con aportaciones sobre extracción en cantera y durabilidad en 1923. Su compatriota, el geólogo estadounidense Stephen Taber publicó trabajos sobre los mecanismos de cristalización de hielo en piedras en 1929 y 1930. El estadounidense Robert John Schaffer publicó “Weathering of natural building stones” en 1932.

La primera carta de restauración de la UNESCO (La Carta de Atenas) fue aceptada internacionalmente en 1931, y a partir de esta época se creó un debate sobre la restauración y los materiales utilizados para la misma. La Carta de la restauración italiana se redactó en 1932 por el Consiglio superiore per le antichità e belle arti (Consejo Superior de Antigüedades y Bellas Artes), y puso límites a las reconstrucciones, apostando por trabajos de conservación frente a los de restauración.

La Junta de Defensa del Tesoro Artístico Nacional se creó para defender el Patrimonio Artístico Nacional en 1933 (segunda república española) y el Servicio de Defensa del Patrimonio Artístico Nacional (SDPAN) se creó en 1938 con la misión de reparar, conservar y reconstruir los bienes artísticos deteriorados durante la Guerra Civil Española, así como de recuperar las obras de arte en posesión del gobierno republicano. Este servicio tendría a lo largo de la historia varios nombres: Comisaría General del Patrimonio Artístico Nacional, Comisaría Nacional del Patrimonio Artístico Nacional, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales y en la actualidad Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

Las “Instrucciones para la Restauración de los Monumentos” se redactaron en 1938, oponiéndose a muchas de las ideas de la Carta de Atenas y a la Carta del Restauo y apostando por la “conservación in situ” de los elementos, lo que demandaría un mayor conocimiento de los factores ambientales de deterioro.

El Instituto Centrale del Restauro (ICR) se creó en el año de 1939. Su primer director, el historiador del arte Cesare Brandi, inició una metodología de trabajo similar a la del Laboratorio de Restauración del Fogg Art Museum de Chicago, comenzando a estudiar el patrimonio desde un punto de vista más científico.

La irrupción de la Segunda Guerra Mundial y posterior instauración de regímenes fascistas en países pioneros y con gran tradición en el estudio de las piedras de construcción, como España e Italia, junto con el creciente interés por el desarrollo del cemento y nuevos materiales, produjo una brecha entre Estados Unidos y Europa con relación a la investigación de piedras de construcción utilizadas en el patrimonio. Estudios sobre piedras de construcción tan relevantes como los de David T. Anstel, 1860; George Perkins Merrill, 1883, 1891, 1987; Alexis A. Julien, 1884, Ira O. Baker, 1890; George W. Hawes, Gerald Francis Loughlin, 1903; T. Nelson Dale, 1908 y 1923; Edwin Clarence Eckel, 1912; D.W. Kessler, 1919, 1927, Stephen Taber 1929, 1930, Robert John Schaffer, 1932 han sido muy poco difundidos y citados en la literatura científica europea.

La Segunda Guerra Mundial también dañó gravemente al Patrimonio Cultural Europeo, paralizó la investigación en los materiales de construcción, lo que generó la fundación de la UNESCO (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization) en 1945. La Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM, en francés) se creó con el objetivo de promover la cooperación científica en el área de materiales y estructuras de construcción y estructuras en 1947.

El Segundo Congreso Internacional de Arquitectos y técnicos de la restauración de los Monumentos se organizó en Venecia en 1964. En él se introdujeron conceptos como el de

“mantenimiento sistemático” como operación fundamental de la conservación y la “conservación in situ” de los restos excavados. Excluyó además “a priori, cualquier trabajo de reconstrucción” y aceptó solamente anastilosis, es decir la recomposición de partes existentes pero desmembradas, el material utilizado para la intervención debería ser plenamente reconocible. La Carta italiana para la Restauración de Monumentos históricos o "Carta del Restauro" (Brandi, 1977) que define los conceptos de conservación, restauración, salvaguardia y reversibilidad, además de dar instrucciones precisas para la custodia del patrimonio se firmó en 1972. En ese mismo año se firmó la convención de UNESCO para la protección del patrimonio mundial, postular e inscribir monumentos en la lista del patrimonio mundial.

En el año de 1975 apareció la Carta Europea del Patrimonio Histórico Arquitectónico (Carta de Amsterdam), la cual cita textualmente: “El Patrimonio arquitectónico Europeo no está formado solamente de los monumentos más importantes, sino también de los conjuntos de edificios que componen nuestra ciudad y nuestros pueblos tradicionales en su ambiente natural o construido”.

En los años 80 del siglo XX comienzan a formarse en España grupos de investigación constituidos mayoritariamente por geólogos dedicados exclusivamente al patrimonio construido. El Dr. Francisco Mingarro y Concepción López de Azcona constituyeron el grupo de investigación denominado actualmente “Grupo de Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio” y en 2006 el Laboratorio de Petrofísica fue certificado por su sistema de gestión de la calidad según la UNE-EN ISO 9001, 2008, de AENOR, y su alcance recoge las principales técnicas de estudio para la caracterización de los materiales pétreos y de construcción utilizados en el patrimonio y sus causas de deterioro y los métodos más adecuados para su conservación.

Procedente del grupo formado por Francisco Mingarro y Concepción López de Azcona surgió el grupo constituido por los doctores Salvador Ordóñez, María Ángeles García del Cura y David Benavente en la Universidad de Alicante.

Otros grupos pioneros fueron los de la Dra. Rosa María Esbert (“Caracterización, Durabilidad y Conservación de Materiales Pétreos”) en la Universidad de Oviedo” y el grupo del Dr. Eduardo

Sebastián de la Universidad de Granada (“Estudio y Conservación de los materiales de construcción en el Patrimonio Arquitectónico”).

Actualmente existe un interés cada vez mayor por la investigación del deterioro de las piedras de construcción. Doehne y Price, 2010 publicaron una magnífica recopilación de artículos recientes sobre el tema.

3.4-Corte y labra tradicional del granito

Existe un patrimonio inmaterial que gira alrededor del arte de la cantería, oficios y fiestas tradicionales atestiguan la gran importancia de este sector resurgente en la Comunidad de Madrid. Desde la extracción tradicional en cantera, hasta la puesta en obra, es necesaria la intervención de numerosos profesionales canteros.

El dominio de las técnicas tradicionales de desbastar, labrar y colocar la piedra, fruto de siglos de experiencia en el arte de la cantería, proporciona al cantero la posibilidad de labrar molduras o muescas en las mismas condiciones que en el pasado, imitando los acabados de sillares utilizados en el patrimonio, en piedras preparadas anteriormente con máquinas. El conocimiento de los materiales, y de los métodos y herramientas manuales de desbastado y labra se hace imprescindible a la hora de aplicarlos en intervenciones de conservación y restauración en edificios del Patrimonio. Para la restauración es necesario sustituir las piezas originales deterioradas por otras de características petrológicas y de talla similares (Lott, 2013).

Dentro de las logias de canteros se diferenciaban tres grados jerárquicos: aprendiz, compañero y maestro. El trabajo de cantería comenzaba con la localización de los afloramientos y posterior desbroce y retirada de tierras mediante pico y pala. Después con el martillo piquero se capeaba el material para detectar fallos e imperfecciones. Los *sacadores* son los operarios encargados de la extracción de las piedras en la cantera, antes de cortar un bloque, determinan visualmente las tres direcciones de corte teniendo en cuenta las fracturas de descompresión y diaclasas: la ley o dirección más fácil de corte; la mano buena, la segunda dirección más fácil y la mano mala o

dirección en la que el corte será peor. Estas tres direcciones definirán los planos del bloque que se quiere extraer y los futuros planos de labra (estereotomía; Fernández Salas, 1996).

Normalmente, la ley es paralela a la superficie original de la cantera, definida por la dirección de las fracturas de descompresión. El cantero marca las direcciones de corte con pico y acodadera, sobre la línea de la ley se realizan huecos equidistantes en donde insertan cuñas de madera que mojan. Estas cuñas se hinchan al hidratarse produciendo la fractura el bloque. Una vez individualizado el bloque, se extrae de su posición original y lo giran 90 grados para que las fisuras de descompresión estén en posición vertical. El corte se realiza a pie de cantera para evitar el transporte de bloques excesivamente grandes.

Pintan o marcan con un puntero de corte, una línea siguiendo la dirección de la ley (fisuras de descompresión). En esta dirección, el corte resultará más plano. Esta línea debe definir, en la medida de lo posible, dos mitades iguales ya que se obtiene una mejor división cuando el peso es igual a ambos lados, si un lado es más débil producirá una ruptura no uniforme.

Los canteros realizan huecos equidistantes sobre esta línea, con un puntero hasta la profundidad deseada, llamados cuñeras, y después los profundizan con otro tipo de puntero llamado engrasadora. En estos orificios se introducen cuñas de acero al menos hasta la mitad de su longitud, nunca llegar al fondo (Shadmon, 1989). Mediante golpes secos con una maza se divide la piedra por la línea previamente marcada. (Hamdi et al., 2008, 2011; Hamdi y Lafhaj 2013), con hilo diamantado y lanza térmica (Baltuille, 2004).

En los talleres de desbaste, los canteros rebajan el granito de acuerdo a las dimensiones marcadas, perfilando perimetralmente (rebajando las aristas) el sillar y dando la forma aproximada a los sillares (Martín, 1994), con las dimensiones aproximadas a las definitivas, dejando siempre una holgura de 3-4 cm denominada "creces" para evitar fracturas que se puedan producir en el transporte y peso inútil que aumentaría el coste. El desbaste se realiza con cincel, martillo de desbastar o martillo neumático.

Desde este punto, se conduce al taller de labra donde el cantero le da la forma y dimensiones al sillar. Para la realización de los distintos elementos de piedra era muy común el uso de plantillas, son estantillones de madera que el arquitecto o maestro de obra proporciona a los canteros para que las piezas que constituyan un elemento tengan la misma forma y dimensiones. Estos escantillones se conservaban durante toda la construcción del edificio para asegurar la homogeneidad de sillares, molduras, ojivas y soportes entre otros elementos.

La labra será basta o tosca, mediana o fina, en función del estilo y la calidad de la obra. Se utilizan diversas herramientas como cinceles lisos o dentados, escodas, almádenas, trinchante, punteros, bujardas, gubias, martillos neumáticos, o discos eléctricos de pulir.

La labra artesanal de Madrid anterior al siglo XIX se realizaba con el trinchante, o hacha de cantero, herramienta en forma de hacha de dos filos de unos 8 centímetros de largo. Ambos filos están siempre en el mismo plano y pueden ser dentados o lisos (escoda). La superficie labrada con el trinchante es plana y se distinguen líneas paralelas. A partir del siglo XVII, la bujarda (enciclopedia francesa, 1751-1772) sustituye paulatinamente el uso del trinchante. Se trata de un martillo de dos bocas cuadradas con una rejilla de dientes. Al golpear repetidamente sobre la piedra con esta herramienta se logra un acabado cuya rugosidad depende del tamaño de los dientes de la bujarda. Normalmente en la labra tradicional de Madrid para el acabado de sillares y escaleras, primero se labra con bujardas de 5×5 picos, 7×7 y finalmente una bujarda fina de 11×11 picos, para conseguir un acabado superficial más plano y liso. Este modo de talla transmite ondas por el interior del sillar que se reflejan en planos anisotrópicos u obstáculos en el interior del sillar, produciendo coalescencia de fracturas y mayor deterioro que la labra con trinchante.

La talla le da un aspecto totalmente acabado al sillar. Normalmente el sillar está rematado en esta fase.

Entre los acabados actuales destaca el acabado pulido que define el gran grupo de las Rocas Ornamentales. El pulido consiste en desgastar la superficie dejándola perfectamente lisa, oscura

y con brillo. Se realiza con abrasivos frotando la superficie y disminuyendo el tamaño de grano del abrasivo para un mejor acabado. Para ello se utiliza una máquina conocida como el tren de pulido con discos que giran o basculan a gran velocidad. En el pulido de granitos se utiliza el esmeril, polvo de alúmina, oxalato de hierro o carborundum, entre otros abrasivos.

El bruñido se realiza para eliminar las rayas producidas por los abrasivos y dar brillo superficial. Se realiza con discos de esparto, agua y blanco de España, trípoli o polvo de azufre.

Actualmente existen máquinas y herramientas que permiten realizar la mayoría de las operaciones de corte y labra en las plantas de procesamiento de piedra natural de una forma más eficaz y rentable que con métodos y herramientas manuales o tradicionales. Estas operaciones mecanizadas mediante las cuales se procesan distintos productos de piedra natural se rigen por procedimientos normalizados por AENOR (UNE-EN).

3.5-El deterioro del granito

El deterioro provoca la variación de las propiedades petrofísicas de una piedra debido a factores intrínsecos y extrínsecos (Sanjurjo y Alves, 2006; Smith, 2008). Los factores intrínsecos, relacionados con la génesis e historia geológica, determinan la composición mineralógica y textural de la roca, y que incluye tamaño, forma, límite de cristales, composición química, porosidad, anisotropía (Pérez-Ortiz, et al., 1996; Lin y Takahashi, 2008).

Los factores extrínsecos que influyen en el deterioro del granito de monumentos o edificios son en un primer momento, los inducidos por la extracción y labra, y a posteriori, los debidos a factores ambientales, arquitectónicos, sociales, económicos (Turkington, 2002), y los debidos a avatares de la propia historia de la construcción: cambios de arquitectos, reformas, reconstrucciones, usos y el tiempo.

Las condiciones metaestables en las que se encuentra el granito en superficie, producto de las diferencias con sus condiciones de formación a gran profundidad (alta temperatura y presión), producen que el deterioro sea un proceso natural, incontrolable e inevitable.

La durabilidad de las piedras de construcción es la capacidad para mantener sus características estéticas, de resistencia y de utilidad frente al deterioro (Niesel, 1981; Turkington, 2002; Bourges, 2006; Sousa, 2014). Es decir, la capacidad de resistir el deterioro y mantener el tamaño y forma de los cristales, la resistencia mecánica (Eberhardt et al., 1999), la densidad, la porosidad (Weiss, et al., 2000), la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido (Přikryl et al., 2003; Martínez-Martínez, 2006), la permeabilidad, la rugosidad, (Alonso et al., 2007; López-Arce et al., 2010, Vázquez-Calvo, 2012), el color (Benavente et al., 2003; Sousa y Gonçalves, 2012; Vázquez et al., 2015) y el aspecto estético, originales en el tiempo (Robertson, 1985; Bell, 1993; Shadmon, 1993). Por lo tanto, es función de las propiedades petrofísicas (Esbert et al., 1989; Fort et al., 2013b).

La durabilidad debe ser evaluada con la medida de varias propiedades, utilizando distintos ensayos, ya que los factores que influyen en el deterioro actúan independientemente (Miglio y

Willmott, 1997; Benavente et al., 2008). Los factores intrínsecos que determinan la durabilidad de las piedras históricas de granito son la porosidad (Ordoñez, et al. 1997; Jeannette 1997, Přikryl, 2001; Sousa, 2013), la superficie específica, la densidad, la resistencia mecánica (Gupta y Seshagiri Rao, 1998; Benavente et al., 2004; Arikan et al., 2007; Vasconcelos et al., 2009; Nováková, et al., 2011), la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido (S y P) que proporcionan una medida indirecta de los módulos elásticos (Brotóns Torres et al., 2013, 2014) y la permeabilidad que están íntimamente ligados con las microfisuras.

Las microfisuras pueden ser debidas a causas tectónicas (Laubach et al., 2004; Anders et al., 2014), a la historia de exhumación del granito (Nadan y Engelder, 2009), en donde se forman fracturas de descompresión (Ziegler et al., 2013, 2014; Benkó et al., 2014) y en el proceso de extracción en cantera, así como en las operaciones llevadas a cabo para la elaboración tradicional de sillares antes mencionadas y las debidas al uso y posición del granito.

Las microfisuras condicionan el deterioro del granito (Lindqvist et al., 2007a, b; Sousa, 2010; Freire-Lista, 2015b), ya que representan la vía de entrada y salida del agua que circula a través de ellas (Vandevoorde, 2009; Ruiz de Argandona, 2009; Vázquez et al., 2010), por lo que la orientación y conectividad (Hoffmann y Niesel, 1992) de las mismas dentro del granito son de máxima importancia (Esbert et al., 1997; Camuffo, 1998). Por lo tanto, para un diagnóstico efectivo del deterioro en un granito se debe definir la orientación de la microfisuración y la procedencia del agua. Aguas que proceden de la lluvia, heladas, estancamientos, suelo, humedad atmosférica, condensación, o fugas de tuberías (Delgado Rodrigues, 1983; Bromblet et al., 1996).

Se deben hacer análisis químicos del agua para determinar si contiene sales y en tal caso, saber de dónde proceden (Moropoulou et al., 2002; López-Arce et al., 2010). Las fuentes pueden ser varias, como estar dentro de la red de fisuras de los sillares, debido a que han sido extraídos de canteras históricas ubicadas en acantilados, cementos y morteros, de aguas subterráneas por ascenso capilar, del mar, aerosoles salinos (Chabas y Jeannette, 2001). También pueden haberse formado a partir de fuentes biogénicas y tratamientos de conservación y limpieza. La presencia

de sales suele ser visible a simple vista, pues forman depósitos de eflorescencias, costras y procesos de decoloración que atacan a los minerales (Török y Rozgonyi, 2004; Esbert, 2007), en otras ocasiones estas eflorescencias se producen en el interior de la piedra, criptoefflorescencias salinas, mucho más agresivas que las primeras (Rodríguez-Navarro et al., 2000, 2002; Alvarez de Buergo, 2004). La eliminación de las sales es complicada (Alonso et al., 2008; Yu y Oguchi, 2010, López-Arce et al., 2011). Una vez detectada el tipo de sal responsable del deterioro, se debe determinar las condiciones de cristalización (Ibañez-Velasco et al., 2015) de la misma y a partir de ahí, controlar, en la medida de lo posible la temperatura, humedad, irradiación solar (horas y temperatura alcanzada) o fuentes de calefacción, viento, ya que estos factores contribuyen a su cristalización. La ubicación del granito en la obra es muy importante, ya que los suelos sufren efectos muy distintos a los de las paredes o las fachadas (García-del-Cura et al., 2008; Pires et al., 2014), donde normalmente los sillares inferiores son los más susceptibles al deterioro y los más expuestos a los agentes agresivos. Se deben conocer los agentes de deterioro que predominan en un emplazamiento determinado (Begonha y Braga, 2002; Hall et al., 2012).

El deterioro natural de la piedra se puede acelerar en el laboratorio mediante ensayos de envejecimiento artificial (Nicholson, 2002; Takarli et al., 2008b; Fort et al., 2015). Las probetas de piedra se exponen a ciclos de variación de condiciones físicas y/o químicas de acuerdo a cada ensayo normalizado (UNE-EN). De esta forma se podrá evaluar la respuesta a cambios cíclicos de temperatura, humedad, salinidad, carbonatación, sulfatación, etc. (Hudec, 1998; Erguler, 2009; Khanlari y Abdilor, 2014).

Esta respuesta se cuantifica con la medida de las variaciones sufridas por las propiedades petrográficas y/o petrofísicas en las probetas ensayadas. El análisis de los resultados, de acuerdo a las condiciones ensayadas, permite determinar los efectos en cada una de las propiedades evaluadas dando información sobre el deterioro que ha sufrido la muestra debido al agente analizado, es decir, los cambios de condiciones físico-químicas. Lo que permite conocer la calidad de una piedra de construcción y establecer su idoneidad para una ubicación bajo unas

condiciones físico/químicas determinadas y/o establecer la eficacia de tratamientos de conservación sobre las mismas (Tabasso y Simon, 2006; Rivas Brea et al., 2008).

Es importante considerar las diferencias entre las condiciones experimentales y las condiciones reales, en las que se encuentra la piedra en la construcción. Estos ensayos no se centran en todos los agentes de deterioro que actúan a la vez y están diseñados para cuantificar la variación media que ha sufrido cada propiedad evaluada en las probetas. La aceleración de los ciclos, el tamaño, orientación y forma de corte de las muestras ensayadas difiere de los reales.

Es preciso emplear piedras de construcción de buena calidad (Yilmaz Günes et al., 2011), con una buena respuesta a las condiciones climáticas y de uso a las que se van a someter en su emplazamiento definitivo (Siegesmund y Török, 2011). Este hecho es de gran importancia para conservar adecuadamente y así evitar el riesgo de un rápido deterioro. Por este motivo y debido a que los mecanismos físicos de deterioro más importantes son los cambios de presión (fatiga estructural) y temperatura ambiental (Camuffo, 1995; Andrés de Pablo y Palacios, 2004; Hall y Thorn, 2014), se han realizado los ensayos de envejecimiento artificial más habituales que son los de hielo/deshielo (Del Río et al., 2005; Chen et al 2008) y choque térmico (Watson, 1990). Su exportación requiere conocer cómo es su comportamiento en condiciones más agresivas. Los cambios de presión están relacionados con la cristalización de hielo o sales, en los espacios vacíos del granito y con la distribución de fuerzas ejercidas en la estructura (Hor y Morihiro, 1998; Coussy y Fen-Chong, 2005; López Arce et al., 2010). Los cambios térmicos están relacionados con el coeficiente de dilatación de los diferentes minerales que componen la piedra, según fenómenos de cambio de temperatura, insolación (Gómez-Heras et al., 2006, 2009; Erguler, 2009; Erguler y Shakoor, 2009; Vázquez-Menéndez et al., 2008), fuego (Gómez-Heras et al., 2008; Gómez-Heras et al., 2009) y fuentes artificiales de calor, produciendo un deterioro debido a la proliferación de fisuras (Hall, 1999; Koch y Siegesmund, 2004; Takarli et al., 2008a).

A pesar de que en términos generales, el granito tiene gran durabilidad (Matías y Alves, 2002) con alta dureza, baja capacidad de absorción de agua y que permite un excelente pulido. En condiciones agresivas, los feldespatos son los minerales más susceptibles al deterioro químico (Sinha et al., 2010; Catlos et al., 2011), que se alteran a minerales arcillosos (Wilson, 2004; Upadhyay, 2012). Esta mineralogía arcillosa hace descender la durabilidad, dureza y aumentar la capacidad de absorción de agua, inhabilitando a los granitos para el pulido. Así pues, se hace evidente la diferencia de durabilidad entre granitos con feldespatos sanos y alterados (Alves et al., 1996; Sousa y Gonçalves, 2013).

En general, y bajo las mismas condiciones, los sillares de granitos con alta porosidad abierta y superficie específica y baja densidad, velocidad de propagación de ultrasonidos (Álvarez de Buergo y González, 1994) y resistencia mecánica tienen menor durabilidad (Sousa et al., 2005). Estas condiciones se pueden asociar a una procedencia de canteras superficiales (Thuro y Scholz, 2004), o de bolos (Røyne et al., 2008), procesos de corte y talla agresivos, estar sometidos a la acción de cargas y/o condiciones ambientales agresivas (Mingarro et al., 2001). Este deterioro se manifiesta por fenómenos de rotura o fisuración, que a su vez favorece la acción de agentes externos, como la succión capilar e infiltración de agua con sales.

Sin embargo, generalmente los sillares históricos de un mismo tipo de granito con menor porosidad y rugosidad, y mayor densidad, cohesión y velocidad de propagación de ultrasonidos, suelen presentar menor deterioro y estar asociados a extracciones de mayor profundidad en cantera, por lo que está ausente el deterioro ambiental.

El deterioro de origen biológico está relacionado con la colonización de organismos (Caneva et al., 1991; De la torre et al., 2010; De Muynck et al., 2010) sobre los monumentos e incluye fenómenos puramente físicos, como la acción enraizamiento de plantas, que pueden introducirse por las fisuras, fracturas o juntas de los sillares, generando tensiones a medida que progresa el enraizamiento y llegar a producir el desplome de sillares. La colonización de líquenes o bacterias que actúan desde la superficie, puede generar un cambio de color en la piedra, dependiendo del organismo que esté presente (Ascaso y Wierzechos, 1996; Del Monte et al.,

1996; Galsomies et al., 1996; Sequeira Braga et al., 2002; Prieto y Silva, 2005; Zedef et al., 2007; Gorbushina, 2007) y corrosión química debida al intercambio iónico durante el proceso de alimentación. La acción de excrementos de animales produce efectos de ensuciamiento y químicos o físico-químicos que aceleran el deterioro (De Oliveira Castello Branco y Cruz, 2002; Gómez-Heras et al., 2004).

El deterioro antropogénico incluye todas las actividades humanas. La extracción en cantera, la manipulación/instalación, aplicación de tratamientos de conservación (Alcalde Moreno y Villegas, 2003), instalación de calefacciones (Varas-Muriel et al. 2014), emisión de contaminantes (Schiavon, 1995; Schiavon et al., 2000, 2002; Winkler, 1997; Grossi et al., 1998; Díaz-Pache, 2001; Esbert et al., 2001; Brimblecombe, 2003; Simão et al., 2006; Brimblecombe y Sturges, 2009) así como los efectos del vandalismo (Rivas et al., 2012) y guerras (Siegesmund et al., 2002) son algunos ejemplos.

4- MATERIALES

Los materiales empleados en los diversos trabajos que se van a describir en esta tesis han sido extraídos de diferentes afloramientos repartidos por distintos puntos de la Sierra de Guadarrama. De Este a Noreste, los cuatro tipos de granitos elegidos proceden de Cadalso de los Vidrios (40.308288, -4.404698), Zarzalejo (40.544034, -4.161135), Alpedrete (40.662455, -4.013727) y Colmenar Viejo (40.661448, -3.741279). Se seleccionaron muestras frescas y orientadas de acuerdo a la cantera. Inicialmente, se tallaron un centenar de probetas cúbicas ($5 \times 5 \times 5 \pm 0,5$ cm) de las que se eligieron 8 probetas para cada tipo de granito y ensayo de envejecimiento. El corte se realizó a baja velocidad (120 rpm) para minimizar la generación de fisuras.

Para el artículo relacionado con el patrimonio de la Comunidad de Madrid se han utilizado dos probetas extraídas de un sillar de granito abandonado en una cantera de Alpedrete, abujardado de forma tradicional de acuerdo con las direcciones de corte.

La descripción petrográfica de los cuatro tipos de granitos estudiados procedentes de las canteras es la siguiente.

Granito de Alpedrete (AL) (Fort et al., 2011). Este granitoide se clasifica como un monzogranito subidiomorfo y equigranular de grano medio, formado por cuarzo (2-3mm y 55-60 % vol.), plagioclasa (1-3 mm y 20-23 % vol.), feldespato potásico (microclina; 2-4 mm y 7-10 % vol.), y biotita (1-2 mm y 10-15 % vol.), teniendo como minerales accesorios: cordierita, apatito, circón y monacita. La plagioclasa es idiomorfa, zonada y con la macla de la albita, el feldespato potásico es subidiomorfo-alotriomorfo, con textura poiquilotópica y exoluciones peritéticas; y el cuarzo se presenta con formas globulares y es marcadamente heterométrico, con inclusiones fluidas.

Granito de Cadalso de los Vidrios (CA) (Fort et al., 2011). Es un leucogranito equigranular de grano medio y de composición homogénea, constituido por cuarzo (2-4 mm y 50-55 % vol.), plagioclasa (1-3 mm y 20-25 % vol.), feldespato potásico (2-4 mm y 20-25 % vol.) y, en menor proporción, biotita (1 mm y 5 % vol.). Como minerales accesorios aparecen circón, apatito,

monacita, esfena, ilmenita, allanita y algunos opacos. La biotita, escasa, se presenta algo cloritizada y formando agregados policristalinos; la plagioclasa, de idiomorfa a subidiomorfa, aparece algo seritizada, zonada y con maclado polisintético (albita). El feldespato potásico es subidiomorfo y aparece albitizado y con texturas poiquilóticas y macla de Carlsbad. El cuarzo es subidiomorfo y con inclusiones fluidas. Este granito se comercializa con la denominación Blanco Cristal.

Granito de Colmenar Viejo (CO) (Fort et al., 2011). Es un monzogranito leucocrático inequigranular de grano grueso-medio constituido por feldespato potásico (5-6 mm y 35-30 % vol.), cuarzo (2-4 mm y 30-40 % vol.), plagioclasa (2-5 mm y 20-28 % vol.), y, en menor medida, biotita (1-2 mm y 7-10 % vol.). Como minerales accesorios aparecen cordierita, moscovita, apatito, circón y opacos. La cordierita se altera a sericita; los feldespatos potásicos son de gran tamaño y varían desde idiomorfos a subidiomorfos y aparecen como pórfidos, con macla de Carlsbad, textura poiquilótica y exsoluciones peritíticas; el cuarzo subidiomorfo aparece formando agregados policristalinos.

Granitos de Zarzalejo (ZA) (Fort et al., 2011). Monzogranito subidiomorfo y equigranular de grano grueso y color gris. Está constituido por cuarzo (2-5 mm y 60 % vol.), plagioclasa (3-4 mm y 15-18 % vol.), feldespato potásico (4-6 mm y 7-10 % vol.), y biotita (2-3 mm y 15 % vol.). Como minerales accesorios destacan el apatito, circón, minerales opacos y monacita. La plagioclasa presenta cristales heterométricos, con zonaciones complejas, grado bajo de seritización y tendencia a formar agregados policristalinos. El feldespato potásico es de gran tamaño, con textura poiquilótica y abundantes exsoluciones peritíticas. La forma del cuarzo varía desde subidiomorfo a alotriomorfo, y se observan microinclusiones fluidas. La biotita es muy abundante y se encuentra ligeramente cloritizada, formando agregados policristalinos.

5- METODOLOGÍA

Cada artículo que esta tesis contiene su respectivo apartado de materiales y métodos de una forma más detallada y específica para alcanzar los objetivos propuestos. En este apartado se van a agrupar todas las técnicas y ensayos empleados, según las propiedades a analizar en los granitos seleccionados.

Por otro lado, se quiere hacer hincapié en la numerosa documentación bibliográfica, tanto escrita como gráfica, que se ha revisado en un gran número de archivos de organismos públicos y privados para cumplir con el segundo objetivo marcado en esta tesis, como han sido los del Archivo de Villa, la Dirección General de Patrimonio de la Comunidad de Madrid, el Ateneo de Madrid, al Instituto del Patrimonio Cultural de España, a los archivos de Patrimonio Nacional, al Instituto de Estudios Madrileños, a la Real Academia de la Historia entre otros. La descripción de las técnicas y ensayos realizados se ha exponer según las propiedades a analizar en la piedra granítica:

5.1- Propiedades Petrográficas

Para el estudio petrográfico con los distintos microscopios y técnicas mineralógicas que se van a describir a continuación se realizó una serie de láminas delgadas de $30 \times 20 \pm 3$ mm y 30 μ m de espesor, a partir de los diferentes estadios de deterioro que van a sufrir los cuatro granitos aquí analizados (AL, CA, CO y ZA). Según los ensayos programados, se realizaron láminas delgadas antes, durante y después de los mismos, y para cada tipo de granito. Estas láminas delgadas han sido cortadas transversalmente a las caras de las probetas más expuestas a la agresión de los ensayos para asegurar la observación de propagación de microfisuras desde la superficie hacia el interior en el caso de las utilizadas para ensayos de envejecimiento artificial acelerado. Otras láminas se han cortado de acuerdo con los planos de corte tradicional del granito en cantera, es decir, paralelas a la dirección de ley, mano buena y mano mala.

5.1.1- Microscopía óptica de luz polarizada (MOP)

Técnica empleada para el estudio composicional y textural de los diferentes materiales pétreos. Se utilizó un microscopio óptico de luz polarizada Olympus BX51, con cámara digital Olympus DP12 (6V/2,5Å) acoplada y software Olympus DP-Soft (versión 3.2). Las láminas delgadas fueron teñidas con cobalto nitrito para distinguir los feldespatos potásicos de las plagioclasas. Las descripciones siguieron la norma UNE-EN 12407: 2007 de métodos de ensayo para piedra natural.

5.1.2- Microscopía óptica de fluorescencia (MOF)

El microscopio óptico de fluorescencia es el mismo microscopio óptico de luz polarizada (Olympus BX51 con cámara digital Olympus DP12, 6V/2,5Å) al cual se le sustituye el tipo de luz. En este caso, se emplea una lámpara de mercurio Olympus U-RFL-T, para la emisión de luz ultravioleta. El objetivo es poder estudiar la porosidad fisural de las mismas muestras estudiadas previamente al microscopio óptico de luz polarizada. Para tal observación se necesita hacer fluorescentes a las muestras, por lo que durante la fabricación de las láminas las muestras se tratan con fluoresceína, para hacerlas fluorescentes.

5.1.3- Fractología

Se efectuó un estudio fractológico sobre todas las láminas delgadas realizadas a todos los granitos estudiados. El objetivo de este estudio ha sido la observación de las microfisuras generadas por los ensayos de envejecimiento llevados a cabo, las microfisuras de descompresión y las generadas por la talla tradicional con bujarda. Se realizaron mosaicos de micrografías MOP y MOF de las láminas delgadas para monitorizar el desarrollo de microfisuras durante los ciclos de envejecimiento artificial acelerado. Los mosaicos de micrografías con nícoles cruzados se utilizaron para la cuantificación de minerales y los mosaicos de fluorescencia para estudiar fisuras. Los mosaicos MOF y MOP de cada lámina delgada se fusionaron y se dibujó en el mosaico resultante una malla definida por líneas perpendiculares y paralelas a los dos lados de la probeta cúbica ensayada y de la cual se realizó la lámina delgada. Las microfisuras se

cuantificaron contando el número total de las que intersectaron con líneas marcadas sobre la fusión de mosaicos, así como el número de microfisuras que atraviesan cuarzo, feldespato y mica, distinguiendo entre microfisuras que se encuentran a lo largo del borde (intercristalinas), en el interior de los cristales (intracristalinas) o que afectaron a más de un grano (transcristalinas). Las microfisuras intercristalinas fueron subdivididas de acuerdo al mineral al que afectan: cuarzo/feldespato, cuarzo/biotita o feldespato/biotita. Por último, se calculó la densidad lineal de microfisuras (número de microfisuras por milímetro lineal). Es decir, contando el número de cada tipo de fisuras que cruzaron las líneas de la red de cuadrados dibujados en el mosaico.

El conteo de las microfisuras de los planos de ley, mano buena y mano mala con microscopía óptica de polarización y fluorescencia permitió ver y cuantificar las microfisuras de descompresión, cuya orientación en el sillar controlará los parámetros petrofísicos y su durabilidad, distinguiendo también entre microfisuras intercristalinas, intracristalinas y transcristalinas. También se calculó la densidad lineal de microfisuras de descompresión y se ha medido la longitud y el distanciamiento medio de microfisuras de descompresión en las mismas líneas.

5.1.4- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El estudio morfológico de la superficie de rotura de los planos ley, mano buena y mano mala de pequeñas lascas del granito de Alpedrete fue realizado con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6400, con microanalizador de energía dispersiva de rayos X (EDS), modelo OXFORD-LINK PENTAFET. Este estudio se centró principalmente en el relieve superficial y dirección de las microfisuras, por lo que las muestras estudiadas fueron fragmento de $< 1\text{cm}^3$, que se metalizaron con oro para hacerlas conductoras. Las condiciones del análisis han sido $0.2\text{--}^{40}\text{ kV}$ de aceleración de voltaje, corriente de $6 \times 10^{-10}\text{ A}$, y vacío de 10^{-5} Torr , resolución de 35 \AA , a distancia de 8 mm y 35 kV and 20 kV de aceleración de voltaje para la adquisición de imágenes.

5.1.5- Difracción de Rayos X (DRX)

Las fases mineralógicas bien cristalizadas de los materiales pétreos analizados fueron determinadas por la técnica de difracción de rayos X y a través la fracción polvo de la muestra total. Fracción de granulometría < 53 micras. El equipo empleado fue un difractómetro Philips Analytical PW 1752 operado a 40 KV y 30 mA, con tubo de ánodo de $\text{CuK}\alpha$, monocromador de grafito y software PC-ADP Diffraction. Las medidas fueron realizadas en un rango entre 2° y 65° , y con un intervalo de $0,02^\circ$ y $2^\circ/\text{min}$ en modo continuo.

5.2- Propiedades Dinámicas

5.2.1- Velocidad de propagación de Ultrasonidos

La velocidad de propagación de ondas de ultrasonidos P (V_p) se midió en modo de transmisión/recepción directa (transductores enfrentados en caras opuestas de la probeta cúbica), y en las tres direcciones del espacio (xyz). Las medidas se realizaron sobre las probetas secas, después de haber estado en estufa a una temperatura de 65°C y alcanzar un peso constante ($\Delta \leq 1\%$). El equipo de ultrasonidos utilizado ha sido un PUNDIT CNS Electronics, con una precisión de $\pm 0,1\ \mu\text{s}$. La frecuencia de los transductores utilizados fue de 1 MHz, su superficie de contacto circular y plana (11,82 mm de diámetro). Para mejorar e incrementar el contacto y la adherencia entre la superficie de la piedra y el transductor se utilizó una sustancia acoplante formado por una pasta de agua y carboximetilcelulosa (marca Sichozeil Kleister, Henkel).

Para la medida de la velocidad de propagación de ondas S (V_s) se ha utilizado un equipo emisor-receptor Panametrics de alto Voltaje (Modelo 5 058 PR) conectado a un osciloscopio Tektronix de fósforo digital (modelo TDS 3 012 B) con transductores Panametrics V151 de 25,4 mm de diámetro y 0,5 MHz acoplados a las muestras con un gel compuesto por 80 % de azúcares (principalmente fructosa y glucosa) y aproximadamente el 20 % de agua. Las condiciones de ensayo fueron: frecuencia de repetición de pulso, 20 Hz y de amortiguación de 200 Ω . La V_s se midió una vez en las tres direcciones ortogonales de las 7 probetas de cada granito, calculando la medida de la V_s para los tres ejes de cada probeta cúbica de cada granito.

La determinación de la velocidad de propagación de las ondas sónicas en las probetas cúbicas siguió el procedimiento establecido por la norma UNE-EN 14579, 2005 de métodos de ensayo para piedra natural.

5.2.2- Anisotropía

La anisotropía de los materiales se obtuvo mediante la medida de la velocidad de propagación de ondas P (Vp) en diferentes direcciones espaciales. Los índices de anisotropía utilizados han sido los propuestos por Birch (1961), Guldader y Denis (1986), Schön (1996) y Ruedrich y Siegesmund (2007) que se relacionan a continuación.

$$k = ((V_{pmax} - V_{pmin}) / V_{pmed}) \times 100 \quad [1] \text{ Birch, 1961}$$

$$A_v \text{ (anisotropy coefficient) } \theta AS = ((V_{pmax} - V_{pmin}) / V_{pmin}) \times 100 \quad [2] \text{ Schön, 1996}$$

$$ARS = ((V_{pmax} - V_{pmin}) / V_{pmax}) \times 100 \quad [3] \text{ Ruedrich y Siegesmund 2007}$$

$$AD = V_{pmin} / V_{pmax} \quad [4] \text{ Schön, 1996, Benavente et al., 2007}$$

$$dM = [1 - (2V_{pmin} / (V_{pmed} + V_{pmax}))] \times 100 \quad [5] \text{ Guldader y Denis, 1986}$$

$$dm = [(2 \times (V_{pmax} - V_{pmed}) / (V_{pmed} + V_{pmax}))] \times 100 \quad [6] \text{ Guldader y Denis, 1986}$$

Las tres velocidades que aparecen en el cálculo de las anisotropías corresponden a las velocidades obtenidas en las tres direcciones ortogonales del espacio: Vpmax corresponde a la máxima velocidad media obtenida en una de las direcciones, Vpmin a la mínima velocidad media, y Vpmed a la intermedia entre las dos anteriores. Todos los autores introducen en sus cálculos de anisotropía la Vpmax y la Vpmin, es decir, dos de los tres ejes espaciales, mientras que otros, además, añaden la Vpmed, considerando así los tres ejes en vez de dos.

Es el caso de las anisotropías definidas por Guldader y Denis 1986, en la anisotropía total (dM) se consideran los tres ejes del espacio, mientras que en la anisotropía relativa (dm) solo se consideran dos de ellos, excluyéndose el eje en el que se ha determinado el menor valor de Vp.

Ambos tipos de índices ofrecen información complementaria, ya que cada uno de ellos nos indica en qué dirección espacial está concentrada la orientación estructural, textural y/o mineralógica que condiciona su anisotropía, por lo que estos índices (dM y dm) proporcionan mayor información que los otros índices referidos.

La identificación de los valores extremos de los resultados obtenidos para cada uno de los índices (y previamente de los valores atípicos) se llevó a cabo mediante la regla de Chebychev. A continuación, se realizó un tratamiento estadístico de los datos a través del proceso de clustering (k-means clustering según Khan y Ahmad, 2004) con el fin de establecer diferentes agrupaciones o clases de anisotropía para cada tipo de material. El número de clases se estableció en función de que cada grupo estuviera constituido por un número mínimo de 8 probetas.

5.3- Propiedades Estructurales

5.3.1- Porosimetría por Intrusión de Hg (PIM)

La porosimetría por intrusión de mercurio se llevó a cabo en una muestra prismática (longitud de 20 ± 2 mm y diámetro de 12 ± 2 mm) de cada granito (AL, CA, CO y ZA) cortada de una esquina superior de una probeta y repetida según los intervalos de ciclos de envejecimiento sufridos en cada caso. El análisis se realizó en muestras secadas en estufa a 70°C hasta un peso constante ($\Delta < 1\%$). Se usó el porosímetro Micromeritics Autopore IV 9500 (presión máxima de 414 MPa - 60.000 psi) con software AUTOPORE 9500 y rango de diámetro de poro de 0,001 a 400 micras. Con esta técnica se obtienen datos de densidades, porosidad total, relación macro-/microporo ($>/< 5\ \mu\text{m}$), morfología de poro y distribución de los tamaños de poro.

5.3.2- Permeabilidad al aire (MTP)

Para la permeabilidad al aire se ha utilizado un permeámetro de aire portátil y no destructivo minipermeameter "TinyPerm II" (miniPERM Perm Tiny) de New England Research Inc. Este equipo mide el tiempo que tarda un volumen de aire en ser absorbido por el granito. Posteriormente, esta tasa se transformó a permeabilidad al aire, en milliDarcy (mD).

El MTP tiene una boquilla de caucho, para garantizar su estanqueidad, de 22 mm de tamaño con un diámetro de entrada de 9 mm que se presiona en contacto con las muestras; generando un vacío en la parte interior del instrumento, un microcontrolador controla el volumen de aire retirado de la roca y el vacío transitorio. Después se disipa el vacío, el microcontrolador calcula un valor característico de acuerdo a los parámetros medidos. El MTP proporciona un valor de tiempo (T) vinculado a la permeabilidad al aire (K, millidarcys (mD) según la siguiente ecuación:

$$T = -0,8206 \times \log_{10} (K) + 12,8737$$

Se han obtenido 5 medidas de permeabilidad a lo largo de cada plano (L, MB y MM) de las 9 probetas. Finalmente se ha calculado la media de las medidas para cada plano.

5.4- Propiedades Hídricas

Los diferentes ensayos destinados a evaluar el comportamiento hídrico de estos granitos permitirá comprender mejor la evolución de su deterioro. De este modo se pueden interpretar procesos y mecanismos de alteración, ya que el agua influye en gran medida en la durabilidad y resistencia mecánica de los materiales pétreos (Fort et al., 2011).

5.4.1- Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total (UNE-EN 1936: 1999/2007)

Mediante este ensayo normalizado se pueden determinar los parámetros estructurales tales como densidad real y aparente, porosidad abierta y total, saturación y compacidad. Aunque estos parámetros reflejan propiedades estructurales de los materiales, se emplea el agua y su actuación en el interior de estos granitos para definirlos. Las probetas secas y con peso constante (Md) se introdujeron en una cámara de vacío para rocas RC-002 a una presión de hasta los 2 kPa durante 2 horas. A continuación, se introdujo lentamente agua en la cámara hasta cubrir las probetas manteniéndose primero la presión de 2 kPa para después restablecer la presión atmosférica. Las probetas se dejaron sumergidas 24h y se pesaron, primero sumergidas con una balanza

hidrostática (Mh) y después saturadas en una balanza normal (Ms). Mediante estos parámetros se determinaron las siguientes fórmulas:

Densidad real (g/cm³) , $Dr = Md / (Ms - Mh)$

Densidad aparente (g/cm³), $Da = Md / (Md - Mh)$

Porosidad abierta (%), $Pa = [(Ms - Md) / (Ms - Mh)] \times 100$

Porosidad total (%), $Pt = [1 - (Da / Dr)] \times 100$

Compacidad (0-1), $C = Da / Dr$

Saturación (%), $S = [(Ms - Md) - Md] \times 100$

5.4.2- Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica (UNE-EN 13755: 2002/2008)

Este ensayo permite determinar la absorción de agua de las probetas de granito por inmersión en agua a presión atmosférica. Después de secar las probetas y alcanzar el peso constante (Md) se sumergieron en agua a presión atmosférica durante un periodo de tiempo específico de 72h. Transcurrido este tiempo se sacaron y se pesaron (Ms), calculándose la absorción de agua en porcentaje:

Absorción (%) = $[(Ms - Md) / Md] \times 100$

5.4.3- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 1925: 1999)

Para este ensayo se seleccionaron dos probetas de cada variedad granítica de acuerdo a los siguientes criterios: probetas con grados de anisotropía distintos, de manera que una de ellas mostrará simultáneamente valores altos de ambos índices de anisotropía, y la otra, valores bajos. En estas probetas se realizó el ensayo de absorción de agua por capilaridad en las dos direcciones definidas por la máxima y mínima velocidad de propagación de ultrasonidos, que corresponderían con las direcciones paralela y perpendicular a los planos de discontinuidades

causantes de la anisotropía El procedimiento fue el secar las probetas hasta pesada constante (Md). Previamente se calcula el área de la base (A) de la probeta que se va a mojar. Se coloca sobre pequeños apoyos en la bandeja donde se va a realizar el ensayo para que no quede apoyada toda la base. Se requiere según la norma que los planos de anisotropía se coloquen a favor de la subida del agua. El ensayo se realiza en recipiente cerrado para evitar la evaporación. Se toman periódicamente tiempos (ti), pesadas (Mi) y altura del nivel visible de capilaridad. Se realizan las gráficas y se calcula el coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

Coeficiente de capilaridad ($\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$), $C = [(Mi-Md)/(A \cdot t_i^{1/2})]$

5.5- Propiedades Superficiales

5.5.1- Dureza superficial

Después de alcanzar el peso constante ($\Delta < 1\%$), se usó un microdurómetro Equotip 3 (D), con una energía de impacto de 11 N/mm. Se realizaron 10 medidas en cada cara de las muestras, con el instrumento en posición vertical hacia abajo y perpendicular la superficie plana y dentro de los 5 mm de los bordes de los cubos para evitar posibles efectos de borde y tenido cuidado en no seleccionar puntos de ensayo cercanos a huecos visibles de la superficie de la piedra. Del total de 60 medidas por muestra, se ha calculado la media para cada tipo de granito. El valor de dureza se expresó como el número de Leeb (valor L), que es la relación de la velocidad de rebote a la velocidad de impacto multiplicado por 1000 (0-1000L).

5.5.2- Espectrofotometría

La diferencia de color se ha calculado con los parámetros utilizados en el sistema CIELAB y en la norma UNE-EN 15886, 2011, calculando la luminosidad (L^*), la coordenada cromática de rojo a verde (a^*), la coordenada cromática de azul a amarillo (b^*), el índice de amarillo (YI^*), el índice de blanco (WI^*) y el cambio global de color (ΔE^*). Se calculó el cambio global del color, $\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$. El espectrofotómetro utilizado ha sido un modelo Minolta CM-700d/600D, con un CM-S100W DATA Software COLOR SpectraMagic NX. Una

vez se ha alcanzado el peso constante de las probetas cúbicas de cada granito, se han realizado 10 medidas de color en cada cara, estableciendo la media de estas 420 medidas por granito.

5.5.3- Rugosidad

Ha sido medida la microrrugosidad de la superficie (plano de rotura) de los planos de ley, mano buena y mano mala con un rugosímetro óptico TRACEiT, perfilómetro portátil y no destructivo, ya que no está en contacto con la superficie medida. Este equipo permite obtener un análisis de alta precisión topográfica 3D a microescala (micrómetros). Midiendo un área de 5×5mm, tiene una resolución de 2,5 μm (eje Z) y 2,5 μm (ejes X/Y). El número de medidas en los ejes X/Y es 2000. Los parámetros de rugosidad analizados fueron calculados por el software del equipo y la norma DIN EN ISO 4287. Se han medido tres parámetros de rugosidad (Ra, Rq y Rz)

(i) Ra es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil de la línea media; (ii) Rq representa la desviación de la raíz cuadrada del perfil evaluado, también conocido como rugosidad de a raíz cuadrada media y (iii) Rz es la suma de las distancias verticales entre los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos dentro de la longitud ensayada.

El punto de corte (λ_c) utilizado para los cálculos es de 0,80 mm. Se han realizado 15 medidas en los planos de ley, mano buena y mano mala de cada probeta y calculado la media para cada plano.

Esta técnica tiene gran importancia ya que el plano de corte de un granito en la dirección de “ley” tiene distinta rugosidad del plano de corte de los planos “mano buena” o “mano mala” (Freire-Lista, 2015c)

5.6- Propiedades Mecánicas

Los módulos elásticos, relación de Poisson (ν_d), módulo de Young (Ed), módulo de cizalla (Gd) y módulo de compresibilidad (Kd) se obtuvieron mediante técnicas no destructivas (a partir de la V_p y V_s) y de acuerdo con las siguientes ecuaciones (3), (4), (5) y (6).

$$v_d = (V_p/V_s)^2 - 2 / 2[(V_p/V_s)^2 - 1] \quad (3)$$

$$E_d = \rho b [3 V_p^2 - 4 V_s^2] / [(V_p/V_s)^2 - 1] \quad (4)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (5)$$

$$K_d = \rho [V_p^2 - (4/3)V_s^2] \quad (6)$$

Donde, V_p es el valor de la velocidad de ondas longitudinales (m/s); V_s es el valor de la velocidad de ondas transversales (m/s); v_d es la relación de Poisson's; E_d es el módulo de Young (GPa); K es el módulo de compresibilidad (GPa); G es el módulo de cizalla (GPa) y ρ es la densidad aparente.

5.7- Ensayos de envejecimiento artificial acelerado

5.7.1- Ensayo de envejecimiento artificial por acción de hielo/deshielo

Para determinar la calidad de los cuatro granitos frente al hielo y deshielo se ha realizado el ensayo de resistencia a la heladicidad en 7 probetas de cada granito (AL, CA, CO y ZA), siguiendo la norma UNE-EN 12371, 2001/2011 para el ensayo de piedra natural. Estas probetas se sometieron a un total de 280 ciclos de 24h de duración cada uno. Los ciclos de congelación en aire y de deshielo en agua se realizó en el laboratorio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en una cámara de climática equipada con un sistema de control para programar los ciclos de hielo/deshielo con una precisión de $\pm 1,0^\circ \text{C}$. Cada ciclo consistió en un período de congelación de seis horas, seguido de un período de descongelación de otras seis horas en el que las probetas se sumergieron en agua.

Cada ciclo se ha dividido en 5 fases. Las muestras fueron saturadas en agua a 20°C y presión atmosférica durante $48 \pm 2 \text{ h}$ y posteriormente se introdujeron en la cámara climática (condiciones secas), espaciadas entre 10 mm y 20 mm. La secuencia de temperatura en cada ciclo de 12 horas fue el siguiente: (i) la temperatura se redujo de 20 a -8°C en 2°C/h (condiciones secas); (ii) descenso a -12°C en 4 h (condiciones secas); (iii) la cámara se rellena automáticamente con agua en 0,5 h hasta que las muestras quedan sumergidas a temperaturas de

5 a 20° C (condiciones húmedas); (iv) las muestras permanecieron sumergidas durante 5 horas; y (v) el agua en la cámara se vació en 0,5 h.

Las muestras se retiraron de la cámara de hielo/deshielo cada 70 ciclos hasta un total de 280 para secarlas en una estufa ventilada a $70^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C. Cada 70 ciclos y al principio y final del ensayo, las probetas fueron sometidas a un tren de ensayos y análisis: petrográficos (MOP y MOF), fractología, porosimetría, velocidad de propagación de las ondas P (0, 70, 140, 210 y 280 ciclos), para cuantificar la acción de las heladas.

5.7.2- Ensayo de envejecimiento artificial acelerado por acción de Choque Térmico

Para determinar la calidad de los cuatro granitos frente a los cambios térmicos se realizó el ensayo de resistencia al choque térmico en 7 probetas de cada granito (AL, CA, CO y ZA), según las indicaciones de la norma UNE-EN 14066, 2003/2014. Estas probetas se sometieron a un total de 42 ciclos de 24h de duración cada uno. Este ensayo fue realizado en el laboratorio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en una cámara de climática equipada con un sistema de control para programar los ciclos de choque térmico con una precisión de $\pm 1,0^{\circ}$ C. En primer lugar, las probetas se han metido en una estufa a $105 \pm 5^{\circ}$ C hasta alcanzar el seco constante. Los ciclos de choque térmico consistieron en tener las probetas 18 horas dentro de la cámara climáticas a temperaturas de $105 \pm 5^{\circ}$ C, y espaciadas entre 10 mm y 20 mm, para a continuación dejarlas 6h sumergidas en agua a $20 \pm 5^{\circ}$ C.

Tanto al principio del ensayo como entre los ciclos nº 21y 22, y al final del mismo, las probetas fueron sometidas a un tren de ensayos y análisis: petrográficos (MOP y MOF), fractología, porosimetría, velocidad de propagación de las ondas P y S, para cuantificar la acción de los cambios térmicos.

5.8- Cartografía de materiales pétreos y formas de deterioro.

Para determinar el principal factor que controla el desplacado del granito se ha cartografiado cada una de las cuatro caras de los sillares inferiores que forman el fuste de las 70 columnas ortoédricas de la Plaza Mayor de Madrid. Recorrida por soportales sostenidos por pilares de granito cuyos lados están orientados casi de acuerdo los puntos cardinales. El fuste lo componen tres sillares ortoédricos de 70 cm en la cara que mira al interior de la plaza x 83 cm de profundidad y 1.20 cm de altura. Se ha determinado el porcentaje de sillares afectados por desplacado, su distribución en altura y orientación.

Una vez realizada la cartografía del deterioro, se ha calculado el área que ocupan los desplacados en el sillar con el software JMicrovision versión 1.2.7.

Para la evaluación del estado de los materiales de construcción tradicional de Madrid, centrándose en los granitos (piedra berroqueña) se ha inventariado el tipo de piedra utilizado en los zócalos de 583 edificios de 35 calles y plazas del Barrio de las Letras de Madrid. El inventario ha sido distinguiendo entre sílex, piedra berroqueña, piedra de Colmenar, piedra de Redueña y otros materiales.

6. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

La tesis presentada está basada en 10 trabajos de investigación publicados o presentados en diferentes revistas, 7 de ellas indexadas, o en diferentes congresos, y siguiendo los objetivos de a) determinar la durabilidad de los granitos explotados en la Sierra del Guadarrama - ampliamente utilizados en el patrimonio construido de la Comunidad de Madrid- y b) poner s en valor estos materiales incidiendo en sus características petrológicas y de calidad. También se incorpora un trabajo de investigación y documentación que será publicado en un libro de divulgación sobre el Barrio de las Letras de Madrid para dar a conocer lo piedra de construcción utilizada en dicha zona la ciudad.

En este sentido, los diferentes trabajos presentados incluyen temáticas que abordan el uso de la piedra de construcción en Madrid, la determinación de las propiedades petrofísicas de cada uno de los materiales graníticos estudiados y su comportamiento frente ambientes en los que los efectos del hielo-deshielo y del choque térmico son importantes, evaluando así su resistencia al deterioro. En base a estos estudios, fue necesario desarrollar una metodología que permitiera establecer cómo se generaban las microfisuras por la acción del hielo-deshielo y por el choque térmico, realizando un estudio pormenorizado que atendía al tipo de microfisura y a los minerales de la roca que afectaba. Este análisis demuestra la importancia que tiene la composición mineralógica y la textura de los diferentes granitos a la hora de entender su respuesta a los procesos de deterioro señalados, ya que controlan el principal factor, la anisotropía, responsable de los mismos. Siguiendo esta metodología, se ha establecido el deterioro diferencial que tienen estos granitos según la técnica de extracción de los bloques y de su labra, que lleva consigo la generación de microfisuras y causa el deterioro observado en los monumentos de Madrid, haciendo un estudio detallado en la Plaza Mayor.

Para alcanzar el objetivo de puesta en valor de los granitos estudiados, y aprovechando la iniciativa de la “International Union of Geological Sciences” (EGU), del “Heritage Stone Task Group” (HSTG) y la “International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission C-10, Building Stone and Ornamental Rock”, se propone a la Piedra Berroqueña para su denominación como “Global Heritage Stone Province” (GHSP), junto a la

pedra de Alpedrete y Zarzalejo como Global Heritage Stone Resource” (GHSR), en base tanto a su uso histórico en el patrimonio construido como en obra nueva. Al igual que en la participación del Libro “Letras” en donde se hace difusión del patrimonio construido con la piedra granítica en el este barrio de las Letras de Madrid.

6.1 Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain.

Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46(4): 421-429. doi: 10.1144/qjegh2012-041.

Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., Gomez-Heras, M., Varas-Muriel, M.J. y **Freire-Lista, D.M.**

En las sucesivas construcciones de Madrid se han utilizado diferentes tipos de piedra, en función de la cercanía y accesibilidad de los recursos geológicos a las zonas de construcción, de su facilidad de extracción, corte y labra o de la existencia de vías de comunicación para el transporte del material. En los últimos siglos han sido los criterios de calidad y durabilidad los factores que han condicionado la selección del tipo de piedra empleada.

La primera piedra de construcción natural utilizada en Madrid fue el sílex, principalmente del siglo IX al XII. Más tarde y hasta el siglo XVII, la dolomía de Redueña resultó la piedra de construcción más empleada en la ciudad, debido fundamentalmente a su color, facilidad de explotación, trabajabilidad y disponibilidad. Al mismo tiempo, se incrementó el uso del granito -tradicionalmente llamado piedra berroqueña-, siendo desde entonces una piedra extensamente empleada en el patrimonio construido de Madrid. Si bien el granito se ha explotado en diversas áreas diferentes, hasta el siglo XVII se extrajo mayormente de las canteras de Zarzalejo. También durante el siglo XVII se explotó el granito de la zona de Alpedrete. En el siglo XVIII, los avances tecnológicos permitieron la explotación mediante minería subterránea de la caliza de Colmenar de Oreja, en el sureste de la provincia. Esta caliza se trata de una piedra de elevada blancura y escasa porosidad, resultando especialmente resistente a los agentes de deterioro. Especialmente la piedra berroqueña y la caliza de Colmenar muestran excelentes propiedades y se siguen utilizando hoy en día tanto en construcción como en ornamentación de fachadas.

En base a sus características petrográficas y petrofísicas, por un lado, el granito de Alpedrete presenta mayor durabilidad que el de Zarzalejo, y la dolomía de Torrelaguna mejor que la de Redueña. Por otro, la caliza procedente de las canteras de Colmenar de Oreja, el sílex y la pizarra de Bernardos también muestran una baja alterabilidad.

Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain

Rafael Fort¹, Monica Alvarez de Buergo^{1*}, Elena M. Perez-Monserrat¹, Miguel Gomez-Heras^{1,2}, M. Jose Varas-Muriel^{1,3} & David M. Freire¹

¹Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), Spanish Research Council CSIC–Complutense University of Madrid UCM, Madrid, Spain

²ETS Arquitectura (UPM) - CEI Moncloa, Madrid, Spain

³Facultad de Ciencias Geológicas, Complutense University of Madrid, UCM, Madrid, Spain

*Corresponding author (e-mail: alvarezm@geo.ucm.es)

Abstract: Many types of stone have been used for construction in Madrid. In historical times, their use was determined by the proximity of the geological resources, the ease of quarrying and transportation links to the city. More recently, as transport connections and quarrying techniques have improved, quality and durability have become key determinants of building stone selection. Local flint was used intensively from the ninth to the eleventh century, when it was replaced by *Redueña* dolostone, used in turn until the seventeenth century. Granitic rocks from the Guadarrama Mountain Range that crop out in the northern and western area of the province increasingly began to be used in the city from the sixteenth century. Traditionally known as *Berroqueña* stone, this building stone was quarried in a number of areas; the primary point of supply was Zarzalejo, and from the eighteenth century the granite used was mainly quarried in the Alpedrete area. Eighteenth century advances in underground quarrying made it possible to extract a limestone (*Colmenar* stone) located in the southeastern part of the region. Together with *Berroqueña* stone, this limestone became one of Madrid's traditional building stones, and both, highly esteemed for their excellent petrophysical properties and durability, are still used today.

The use of stone is deeply rooted in Spanish building culture. The Iberian Peninsula has a wide variety of high-quality rocks well suited to use in construction, including granite, limestone, sandstone, marble and slate. In antiquity, the type of stone used to build civil, military and religious structures was determined by the accessibility of the material and the workability (carving) of the stone using the technology available at that time. Consequently, in ancient times the use of stone on the Iberian Peninsula primarily was a local endeavour, because of the high cost and considerable difficulty involved in transporting large blocks over long distances. Such difficulties were aggravated by geographical peculiarities because, in addition to being one of the most mountainous regions of Europe, the peninsula has a paucity of navigable rivers. As a result, many of its cities were built with only one type of locally quarried stone and the lithological variety of their monuments depends on nearby outcrops. The location of urban centres may have even been chosen on the grounds of the proximity and availability of construction materials, as well as of the natural resources required for survival, such as water.

Stone lends character to the built heritage and a stone type is often associated with a particular place (Gomez-Heras *et al.* 2010). Traditional building stone may be defined as the rocks continuously and commonly used throughout the history of a given town or region. Prior to the Industrial Revolution and the rise of technocratic criteria for stone selection such as petrophysical properties and durability, the aesthetic features of stone, primarily colour, were more highly valued (Gomez-Heras & Fort 2004; Gomez-Heras *et al.* 2010). The preferred colour tended to vary over time with fashion, and with builders' and architects' tastes. Traditional stone defines the colour and texture of cities and shapes their aesthetic portrayal and perception. The use of stone in cities may, therefore, vary because of

changes in aesthetic values, improvements in quarrying techniques and workability, or the development of improved inland connections and vehicles, as well as because of a fuller understanding of material behaviour and decay, inducing the rejection in later periods of formerly popular but low-durability materials (Dreesen & Duser 2004).

In the city of Madrid, traditional building stones have primarily been used from the ninth to the nineteenth century. With the opening of Spain's first railway in the middle of the nineteenth century, new construction stones began to be brought in from other regions of Spain as well as other countries (Gomez-Heras & Fort 2003), a practice that has grown steadily ever since. The petrophysical properties that characterize such materials, which are frequently very different from the traditional stone and often previously unknown, determine their medium- and long-term durability and resistance to decay.

Madrid's geological surroundings

The geology in the centre of the Iberian Peninsula is particularly rich in natural stone for use in monumental works, for it comprises a wide variety of rocks whose petrophysical properties are very well suited to construction. The geology of the Community (or region) of Madrid is depicted in Figure 1. Two main groups of materials can be distinguished: (1) the igneous and metamorphic rocks found in the Guadarrama Mountain Range (Spanish Central System, Variscan Orogeny) in the north and NW, which provides the widest variety of building stone types (granite, slate and porphyry); (2) the sedimentary rocks, comprising Cretaceous limestones and dolostones in the north, Miocene limestones in the SE and flint near the city (Mendiña & Fort 2005).

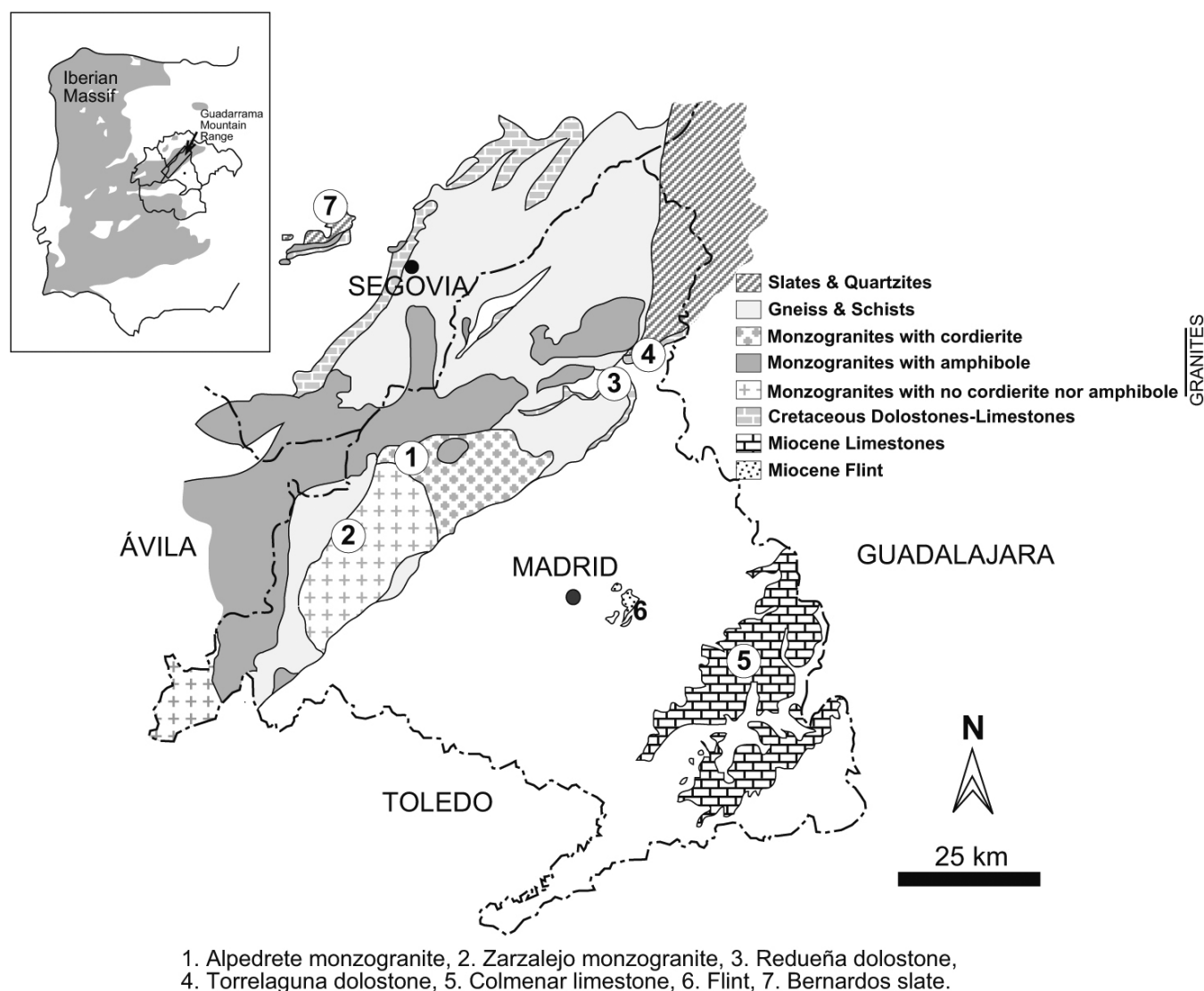


Fig. 1. Schematic geology of the Madrid region and the location of quarries sampled.

Guadarrama Mountain Range

This mountain range, belonging to the Spanish Central System domain, furnishes the widest variety of building stone. The material most commonly used in Madrid is *Berroqueña* stone, which includes granite with different petrographic and petrophysical properties depending on the pluton from which it is quarried (Villasaca *et al.* 1998, 2009). There are three main plutonic groups (Fig. 1): monzogranites with cordierite, monzogranites with amphibole and monzogranites with neither of these minerals. All of them comprise several intrusive units, which in turn host leucogranites with a fine- to medium-grained phaneritic texture and, besides uniform facies, a porphyritic one is also identified in the first and third monzogranite types.

The granites found in Madrid are from the plutons closest to the city. Therefore, the first type of granite traditionally used in Madrid has been quarried in the Valdemorillo and Zarzalejo areas and it is a variety without either cordierite or amphibole. It is a biotitic monzogranite that has a medium-coarse grain (2–5 mm), phaneritic texture and nearly 15% biotite arranged in 4–10 mm nodular clusters (Fort *et al.* 2011). These biotitic monzogranites, located in the western branch of the Guadarrama Mountain Range, were quarried to build

the Royal Monastery at El Escorial in the sixteenth century and were widely used at the capital city during the sixteenth and seventeenth centuries. The second type are the monzogranites containing cordierite, which are biotitic (nearly 10% biotite) and have an equigranular texture with fine-medium grain (1–3 mm crystals). They crop out primarily in Alpedrete, Torrelodones and Colmenar Viejo, and were used for Madrilenian constructions mainly from the eighteenth century. These two biotitic monzogranites display microgranular enclaves, which are more abundant and larger in those cropping out at Valdemorillo–Zarzalejo area (Fort *et al.* 2010).

The amphibole-containing granites were not used in construction until much later because of their more distant location, in the SW region of the Guadarrama Mountain.

In addition to granite, porphyry was also used in Madrid's buildings. Quarried from the dykes found in the Colmenar Viejo granites, these are dark rocks with a micro- to cryptocrystalline structure, with a dioritic to granodioritic and quartz dioritic to quartz monzonitic composition (Doblas *et al.* 1988). These rocks were dimensioned for use for stone setts to pave the city streets.

Slate was used to roof only the most emblematic buildings in Madrid. It was brought in from the Bernardos quarries in the province of Segovia, located in the Schist–Greywacke Complex, which

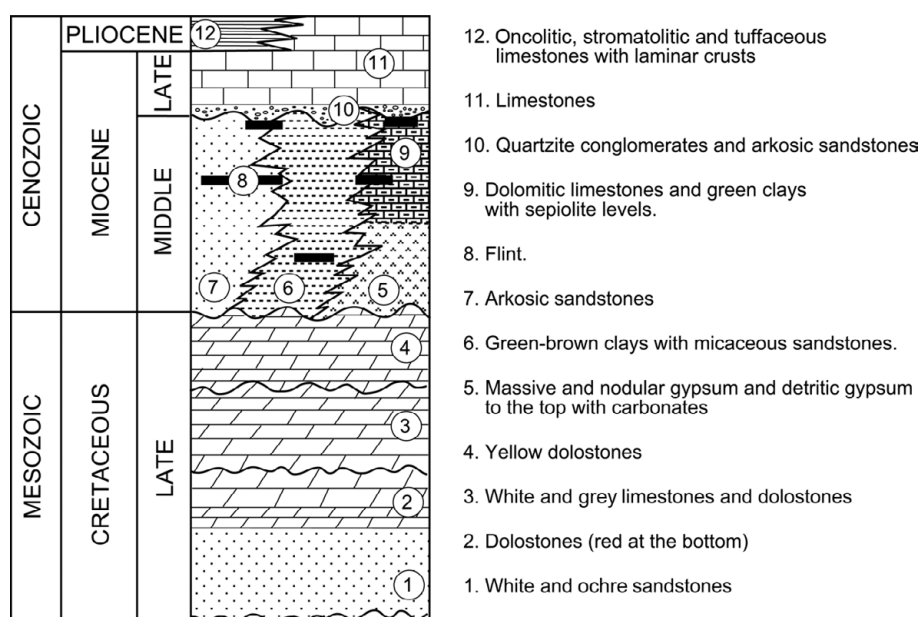


Fig. 2. Schematic stratigraphic column of the Madrid basin, showing only those units from which stone was extracted to build the city.

dates from the Precambrian or Early Cambrian period, in the Central Iberian zone of the peninsula (Alonso *et al.* 2005). The monastery at El Escorial and other Madrilenian buildings were roofed with slate to emulate the central European construction styles and techniques introduced by the Habsburg dynasty. Bernardos slate is black and smooth, with a grain size ranging from 55 to 70 μm . Other types of slate crop out in northwestern Madrid, where they were used in local construction. Their absence in the capital city is explained primarily by their much lower quality than the Bernardos stone.

Cretaceous rocks

Cretaceous materials crop out in the north-NE part of the province, being the *Redueña* stone (limestone and dolostone) widely used in Madrid. The base comprises clastic deposits, discordant with and overlying granite or metamorphic Palaeozoic materials. These deposits are in turn overlain by dolostones and limestones, both widely used in regional construction. The initial reddish dolostone in the carbonatic sequence gives way to a whitish ochre dolomitic unit known as *Caballar* dolostone, which is abundant in the Redueña area. Resting on the Caballar material is an erosive discordant limestone and dolostone formation known as *Castrojimeno*. This formation consists of massive white and grey dolostone with a predominance of rudistid and stromatolite bioconstructions. Very abundant around Torrelaguna, it extends into the province of Guadalajara. It has been dated between the late Coniacian and the Santonian, Late Cretaceous (Alonso 1981).

Madrid Tertiary Basin

The substrate on which the SE area of the region of Madrid rests coincides largely with what is known as the Madrid Tertiary Basin, which has three units. The lowest unit comprises primarily evaporitic and clayey facies, with a transition into more detrital facies along the edge of the basin. The intermediate unit has a wide variety of facies with a predominance of lacustrine carbonatic, mostly dolomitic, rocks with a diagenesis characterized by de-dolomitization. This unit also hosts silicified limestones and

dolostones containing sepiolite and flint (Calvo *et al.* 1984, 1989; Wright & Alonso Zarza 1990) that were used in Madrid's built heritage. Flint was intensely quarried around Madrid, although only one historical quarry, at Cerro de la Mesa, still exists. The rock that hosts flint is a micritic limestone and different types of flint, in colour and quality, have been identified. Silicification initially gave rise to opal, which diagenetic weathering subsequently transformed into quartz (Bustillo *et al.* 2012).

The uppermost unit, pinkish white lacustrine and fluvial-lacustrine limestones, is found in various beds with thicknesses of up to 40 m. The stone most representative of Madrilenian construction was extracted from this upper unit in mines at Colmenar de Oreja quarry, in the SE area of the basin. Of the eight beds in this quarry, the so-called *Banco Gordo* (thick bank) yields the stone that is most white and also of the highest quality, which was the building material most commonly used in Madrid (Dapena *et al.* 1989). These limestones, petrographically classified as biomicrite-biosparite, consist of a bioclast skeleton (40% Characeae, ostracods and gastropods) and a paste in which the micritic matrix (20–30%) alternates with sparitic cement (30–40%). The same limestones quarried in other areas exhibit similar properties, but are composed primarily of more porous oncolitic rocks or more edaphic stone deposited over the oncolites and exhibiting significant bioturbation. In the southern and eastern areas of the basin, they underlie a thin complex of fluvial Pliocene sediments, which in some places contain oncolites, stromatolites, tuffaceous limestone, lacustrine sediments and calcretes (Ordóñez *et al.* 1984; García del Cura *et al.* 1994; Sanz 1996). Figure 2 summarizes the stratigraphic series in the Madrid Tertiary Basin and late Cretaceous materials, including only the sedimentary units from which building stone was extracted.

Traditional stone used in Madrid and its origins

Water, clay minerals and stone resources were exploited in Madrid from early times and the earliest stoneworks in the region of Madrid were the products of the flint industry. These tools have been found at a number of early Palaeolithic (1 Ma–125 ka) sites, located on river banks. Quartzite and flint pebbles

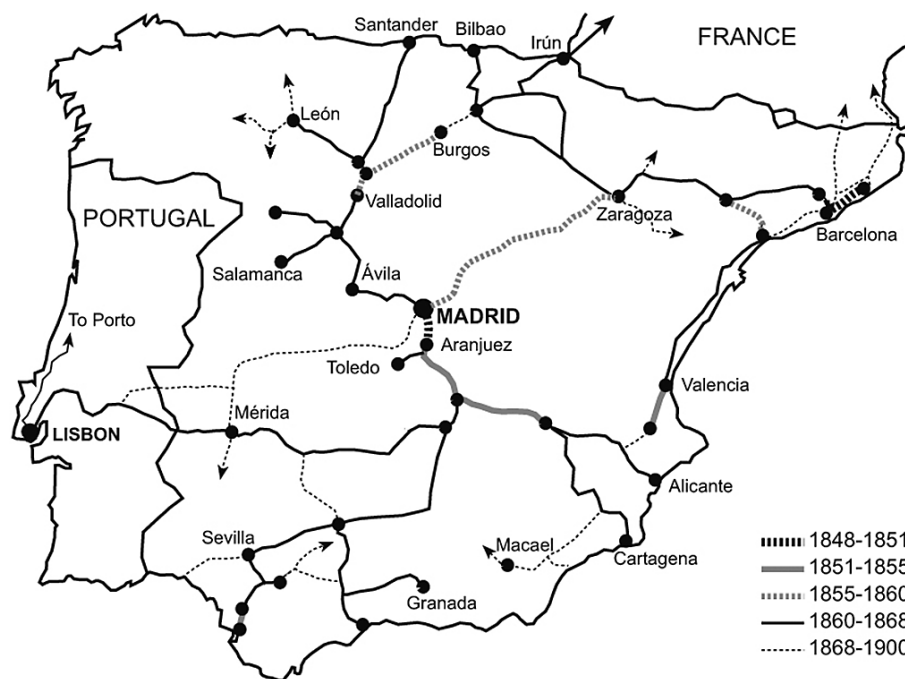


Fig. 3. Railway network evolution during the second half of the nineteenth century (modified from Gomez-Heras & Fort 2003).

cropping out in alluvial deposits or their terraces were used as source materials.

The use of stone for construction did not begin in the region of Madrid until the Iron Age, when the Celtiberians built the first fortified structures, which were mainly of adobe with plinths made of stone. Its first use in the city of Madrid can be traced back to a Muslim enclave built as an outpost to defend the nearby city of Toledo, located to the south of Madrid. It had a walled fortress built around the year 852 for that purpose. The complex was constructed with flint rubblestone and rough dolostone ashlar from the intermediate unit of the Madrid Tertiary Basin, as well as brick. Rubblestone is a rough and unhewn building stone set in mortar but not laid in regular string courses that can be used as the outer surface of a wall (rubble masonry) or filling the core of a wall (rubble as inner wall filler); and ashlar are a large square-cut stones, generally used as a facing material. When the Christians led by King Alphonse VI conquered this enclave in 1085, they built another outer wall and more buildings with Upper Cretaceous carbonatic rocks and granite from the mountains in the region, in addition to flint.

It was not until 1561, however, when Philip II moved his court to the city, that Madrid was significantly developed, with the construction of new palaces, churches and monasteries. This was the period when *Berroqueña* stone from the granite plutons in the northwestern to western area of the province (Zarzalejo area) was introduced. These were the same plutons that supplied the stone used to build the Royal Monastery at El Escorial (1563–1584). Those works led to a change in taste, made possible by the construction of new roadways connecting Madrid and El Escorial, in which brick, flint and even Cretaceous limestone gave way to the granite used in the monastery.

The eighteenth century brought a second revolution in the use of stone in Madrid, led by the Bourbon dynasty. The construction of the Royal Palace (1735–1764), with its combination of *Berroqueña* stone, from the Alpedrete and Torrelodones areas, and the Tertiary limestone (*Colmenar* stone), both still in use today, defined new styles and usage. The city was not to see construction on such a scale again until 1830, after the Napoleonic invasion, when public works began to be undertaken to build the region's water utility (Isabel II

Canal). These works started in 1848 and granite and porphyry brought in from the Alpedrete–Colmenar Viejo area, as well as Cretaceous limestone and dolostone, were used to build most of the canal.

In the nineteenth century, the use of natural stone in Madrilenian monuments underwent yet another major change, driven in this case by the commissioning of the first railway line (Madrid to Aranjuez, in 1851). The subsequent expansion of the railway network across the entire peninsula lowered shipping costs from many locations, favouring the arrival of new types of stone whose use in Madrid had formerly been limited or non-existent. Stone thus began to be shipped from anywhere in the country that was connected by rail to the capital city. Material could even be imported from Portugal and other countries with good connections, via sea ports such as at Santander or railway networks (Fig. 3).

Intra-regional routes for natural stone in Madrid

As noted above, the use of stone depended, among other factors, on the location of quarries, the existence of good inland connections and the capacity of contemporary vehicles; it was those factors that determined the size and number of blocks that could be transported. Spain's earliest inland connections were the roads built by the Romans. Two roads ran very close to Madrid: one connected Emerita Augusta (today's Mérida, in the SW of the Toledo region) and Cesaraugusta (now Zaragoza, in the NE of the Guadalajara province) through Toledo, Titulcia and Complutum (now Alcalá de Henares, in the eastern part of the Madrid region); the other road ran from Titulcia to Segovia. Madrid was also close to other roads, such as the Mantua Carpetana, which from Complutum connected both Segovia, through Torrelaguna, and Toledo, passing near Aranjuez (Alonso Otero 1988) (Fig. 4).

Some of these roads were still in use in the region during the Muslim era (ninth to eleventh centuries), such as the northern route into the region, running from Lozoya (north) to Torrelaguna (NE). Although this road was heavily travelled, its poor state of repair was an obstacle to its use for carrying stone from the Cretaceous quarries it



Fig. 4. Historical roads in the region of Madrid.

passed (Menéndez Martínez *et al.* 1996). This fact meant that one of Madrid's first building stones was flint, which cropped out on hills located within the city. It was used to build the Arabian walls, which were among the earliest urban structures. Flint met two important requirements: it was sturdy and durable, particularly important for defensive structures, and its lens-type deposits made it fairly easy to quarry. Moreover, its proximity to development sites facilitated and expedited construction. In particular, it reduced transport risk, which is, and was, an issue of primary importance in areas subject to continuing conflict. Flint continued to be used until the twelfth century, when the city's second wall was built. Later it was used primarily as rubble-stone. Whether newly quarried or taken from former structures such as the Arabian walls, which were largely demolished in the sixteenth century, flint was also used as inner wall filler and in building foundations.

The very hard flint ceased to be used in Madrid most probably owing to the difficulties involved in hewing and carving it rather than its suitability and availability as a construction stone. Moreover, with the relative peace that came with the consolidation of Christian rule after the twelfth century, roads became safer. More readily hewn and carved rocks such as Cretaceous limestone and dolostone could therefore be brought in from the northern and northeastern part of the region (*Redueña* stone) over the old *Redueña* and *Torrelaguna* Roman road (Fig. 4). Granite also began to be carried to the city from the mountains. The main rock used in the construction of the city in the sixteenth century was *Berroqueña* stone, in particular the medium- to coarse-grained monzogranite quarried in the El Escorial–Zarzalejo area and used also to build the El Escorial Monastery. The sixteenth-century location of the

capital city in Madrid coincided with the completion of the monastery. As a result, many of the stonemasons moved to the city, where they used the rocks they were familiar with, mainly the granite that cropped out at the El Escorial–Zarzalejo quarries (which happened to be owned by the king). This stone was most probably carried to Madrid via the road that passed through *Torrelodones* or via the road that ran through *Valdemorillo*, crossing the road that passed near the ancient location of *Titulcia* (Fig. 4). The existence of these roads made the quarries in the *Valdemorillo* and *El Escorial–Zarzalejo* areas equally accessible. *Berroqueña* stone from the El Escorial–Zarzalejo and *Valdemorillo* areas was extensively used in Madrid in the sixteenth and seventeenth centuries, until it was gradually replaced by the monzogranites from *Alpedrete* and its surroundings, whose quarries were closer to the city. These granites were the stone used in many of the emblematic buildings constructed during Charles III's eighteenth century reign, including the Royal Palace of Madrid.

Very few *Redueña* stone structures, or their remains, are to be found in Madrid today, possibly owing to the nineteenth century demolition of many of those buildings in the wake of the confiscation of church property and urban expansion of the city. Significant use of *Redueña* stone came to an end in the eighteenth century, when the Tertiary limestone called *Colmenar* stone was introduced to Madrid. The emergence of this material in the capital city was supported by its higher durability compared with *Redueña* stone, and the growing need for large volumes of stone to build the Royal Palace. A significant factor in the successful construction of the Royal Palace was the construction in 1740 of

the Long Bridge at Aranjuez, over the Jarama River (Fig. 4), as it fostered the transport of the stone from the Colmenar de Oreja quarries to Madrid. This bridge, possibly shaped with *Colmenar* limestone, replaced a wooden one, called the Barcas Bridge. Later on, during the nineteenth century, one of the key factors supporting the introduction of *Colmenar* stone to Madrid was the construction of the first railway in the region (1851), to connect the capital city to Aranjuez and subsequently to Alicante (Fig. 3). This, in turn, encouraged the arrival in the city of Madrid, and its entire province, of new and more economically competitive materials such as *Novelda* stone (Fort *et al.* 2002). In 1865, this railway line was extended to Zaragoza in NE Spain, by way of Guadalajara. With the expansion of the railroad to Portugal in 1880, stone from that country could also be economically shipped to Madrid (Gomez-Heras & Fort 2004).

Stone durability

According to Bell (1993) the durability of a building stone is a measure of its ability to resist weathering and therefore retain its original size, shape, strength and appearance over an extensive period of time. As built heritage materials resist decay differently, special attention should be paid to achieve durability if constructions are intended to last for long periods of time (Peris Mora 2007). The specific resistance characteristic of each type of stone is determined by its petrophysical properties. The pursuit of building durability in the past was often the reason for choosing stone as the main construction material. In the first century BC Vitruvius noted in his treatises on architecture that good stone buildings must be handsome, functional, sound and long-lasting (Oliver Domingo 1997), but substantial progress in understanding decay came only in the nineteenth century, when experts observed that not all rocks behaved in the same way when exposed to a given agent (Jiménez González 2008). For that reason, and owing to the increase in inter-regional stone trade and shipping, durability began to be the subject of laboratory trials (Gomez-Heras & Fort 2003). Rock performance against the agents of decay and those agents most commonly found at any given site had to be determined to estimate the most suitable type of stone for that site.

Physical alterations such as cracking and loss of strength or material are due to stresses generated inside the rock (Calleja & Montoto 1982; Tsui *et al.* 2003; Sousa *et al.* 2005). Such stresses may arise in response to the action of water or ice, soluble salts that may crystallize and rehydrate inside the rock, temperature changes (Pérez-Ortiz *et al.* 1994; Alves *et al.* 1996; Vicente 1996; Gomez-Heras *et al.* 2006; Moreno *et al.* 2006; Vázquez Menéndez 2010; Molina *et al.* 2011) and the pressure exerted by the weight of construction materials themselves.

Petrographic characteristics provide very valuable information on the quality and hence the durability of rocks. Coarsely textured, highly laminated rocks with soft minerals such as clay are more susceptible to decay (Delgado Rodrigues 2001; Veniale *et al.* 2001; López-Arce *et al.* 2010; Török & Vászrhelyi 2010).

Petrophysical properties also furnish information on material durability. Porosity, hydraulic behaviour and mechanical strength determine the suitability of a rock for construction, for these properties condition its durability against external agents. The number of pores or cracks and pore-size distribution are parameters needed to assess rocks (Haynes 1973; Montoto 1983; Alonso *et al.* 1987; Bustillo *et al.* 1993; Esbert *et al.* 1997). Rock porosity favours the ingress of agents such as water, salt solutions and pollutants that induce decay. Moreover, the mobility of these agents inside the stone depends on pore-size distribution, its morphology and tortuosity (interconnectivity). One of the oldest parameters used is the saturation coefficient (Hirschwald 1908); others such as capillary porosity and microporosity (pores with a diam-

eter of less than 5 µm; Russell 1927) were introduced later. Microporous rocks or rocks with high capillary porosity are more susceptible to salt crystallization- and frost-induced decay (Rossi-Manaresi & Tucci 1989; Punuru *et al.* 1990; Richardson 1991; Ordóñez *et al.* 1997; Benavente *et al.* 2004). Furthermore, insofar as it constitutes gaps in the solid phase of the rock creating weak areas, porosity has an obvious impact on mechanical properties.

The degree of anisotropy is another factor that may expedite material decay, for it often favours water ingress through slip planes (structural, textural or mineralogical orientations), generating differential decay (Fort *et al.* 2008, 2011).

Durability of traditional Madrid stone

Berroqueña stone

Although the granites traditionally used in Madrilenian construction are mineralogically similar, the variation in their quartz, feldspar and mica contents largely conditions their durability. Feldspars and micas are significantly altered by the action of fluids and concomitant hydrolysis. Potassium feldspar is replaced by kaolinite, plagioclases are altered to sericite, and biotite to chlorite. Hydrolysis may also release iron from biotite, occasioning widespread oxidation of its nodular clusters, especially in the granites that crop out in the northwestern part of the province (Zarzalejo and Valdemorillo areas), which have 15% biotite content. In addition, their higher biotite content favours salt crystallization-induced decay, owing to the salts crystallizing between the biotite layers (López-Arce *et al.* 2010). Cordierite alteration, in turn, yields pinite or micaceous clusters that decay more quickly, although cordierite is present in scant quantities in these granites.

Although these processes are often the result of hydrothermal change or surface weathering prior to quarrying, they condition the mineral response once the stone is laid. Furthermore, these granites from the NW of the region, which have a larger crystal size (2–5 mm), are more susceptible to decay than the stone from the northern part of the province, characterized by smaller crystals (1–3 mm). Both types of monzogranites have porphyritic facies, as has already been mentioned, which tend to be more readily altered than the so-called uniform facies. Likewise, the occurrence of microgranular enclaves in these granites may also expedite weathering owing to differential thermal behaviour associated with non-uniformities, in conjunction with other factors (Gomez-Heras *et al.* 2008).

According to the data shown in Table 1, Alpedrete stone should be the most durable granite, in light of its lower porosity accessible to water ($0.8 \pm 0.1\%$), high ultrasound velocity ($V_p, 4601 \pm 204 \text{ m s}^{-1}$) and lower anisotropy indices ($\Delta dM, 5.8\%$, $\Delta dm, 1.9\%$) where, according to Guydader & Denis (1986), these indices are

total anisotropy :

$$dM\% = \{1 - [2V_{p_{\min}} / (V_{p_{\text{mean}}} + V_{p_{\max}})]\} \times 100$$

relative anisotropy :

$$dm\% = [2(V_{p_{\max}} - V_{p_{\text{mean}}}) / (V_{p_{\text{mean}}} + V_{p_{\max}})] \times 100$$

The Alpedrete stone has lower capillary absorption coefficients of $1.5\text{--}3.9 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ compared with the values for Zarzalejo granite, which range from 4.2 to $4.8 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ (Fort *et al.* 2011). These findings are concordant with the pore-size distribution values in the two granites, which show that porosity accessible to Hg is lower in the Alpedrete stone (0.5% compared with 1.4%). The pore-size distributions of the granite rocks studied (Fig. 5) show that Alpedrete stone has a very clear mode (18% of the porosity is in the 0.1–0.4 µm range)

Table 1. Petrophysical properties for traditional Madrilenian stone

Property	Stone						
	Alpedrete granite	Zarzalejo granite	Redueña dolostone	Torrelaguna dolostone	Colmenar limestone	Bernardos slate	Black flint
Density (g cm ⁻³)	2669±17	2662±21	2349±92	2527±38	2579±30	2751±7	2430±11
Water absorption (%)	0.3±0.00	0.6±0.0	5.6±1.4	3.3±0.6	0.8±0.4	0.2±0.0	0.6±0.1
Porosity accessible to water (%)	0.8±0.1	1.6±0.1	16.2±3.4	10.0±1.4	3.8±1.2	0.4±0.1	1.6±0.2
Porosity accessible to Hg (%)	0.5	1.4	17.9	7.5	3.9	0.5	1.3
% Microporosity	99	99	99	99	84	98	67
% Macroporosity	1	1	1	1	16	2	33
<i>V_p</i> (m s ⁻¹)	4601±204	3296±198	2753±314	3788±278	5941±111	5694±183	5671±85
ΔdM (%)	5.8	12.7	5.6	5.6	3.1	33.6	1.1
Δdm (%)	1.9	3.1	3.9	3.3	1.2	5.8	1.9

and the size distribution of Zarzalejo stone is bimodal (the 0.1–0.2 and 1–4 μm ranges mode accounts for nearly 24% of the distribution), which facilitates capillary water absorption inside Zarzalejo granite.

Redueña and Colmenar stones

The Cretaceous limestones and dolostones exhibit different degrees of de-dolomitization, with the stone from Redueña quarries being more readily altered than the Torrelaguna stone, which has smaller crystals and a greater degree of cementation (lower porosity) (Fort *et al.* 2008). The Miocene limestone (Colmenar stone) has a more uniform mineralogical composition, consisting of calcite microcrystals (micrite) and Characeae, gastropod and ostracod bioclasts (10–20%) (Wright *et al.* 1997; Volery *et al.* 2010). According to the classification of Folk (1959, 1962), Redueña stone is a dolmicrite and Colmenar stone a bioclastic micrite.

Of the two dolostones for which data are discussed above, the Torrelaguna variety is more durable than the Redueña dolostone, according to the petrophysical parameters analysed. The Torrelaguna stone has higher ultrasound velocity (V_p 3788±278 m s⁻¹) than the Redueña stone (V_p 2753±314 m s⁻¹) and lower porosity accessible to water (10.0±1.4% compared with 16.2±3.4%) and to mercury (7.5% compared with 17.9%) (Table 1). Although the pore-size distribution is unimodal in both stones, in the Torrelaguna stone 50% of the pores are in 1–2 μm range, whereas only 25% of the pores are found in the 1–6 μm range in the Redueña variety (Fig. 5). Fort *et al.* (2011) reported a very high capillary absorption coefficient for Redueña stone (86–89 g m⁻² s^{-0.5}), whereas the values for the Torrelaguna stone are between 8 and 52 g m⁻² s^{-0.5}, depending on the direction in which the absorption was measured (owing to the material's anisotropy). These properties explain why decay owing to salt solution-induced salt crystallization is more intense in Redueña dolostone (Fort *et al.* 2008).

The most durable of these carbonatic rocks is Colmenar limestone, given its petrophysical parameter values in Table 1. Its compactness, as defined by ultrasound velocity (V_p), is higher (5941±111 m s⁻¹) than that of the Redueña and Torrelaguna dolostones. Its anisotropy is very low, 4.3% for $\Delta dM + \Delta dm$ (sum of total and relative anisotropy). Its porosity accessible to water is also low (3.8±1.2%). Because most of its pore-size distribution lies in the 0.01–0.1 μm range (Fig. 5), capillary water absorption does not pose a significant problem.

Bernardos slate and black flint

This rock is texturally very smooth, although with slight differences in its particle-size distribution associated with its mineralogical

composition (70–55 μm quartz and phyllosilicates <65 μm). Quartz and some plagioclase (albite) appear in clusters and 0.5–1 mm thick bands adjacent to the phyllosilicates. Phyllosilicates, and more specifically biotite, muscovite and chlorite, constitute the predominant mineralogy. Apatite, tourmaline, zircon and rutile are accessory minerals. This stone also exhibits acceptable and suitable petrophysical parameters, with a very high ultrasound velocity at 5694±183 m s⁻¹, similar to Colmenar stone, and an especially low porosity accessible to water (0.4±0.1%). Even its capillary water absorption parallel to the slip plane is reasonable, at 0.17–0.28 m⁻² s^{-0.5} (Fort *et al.* 2011), despite its anisotropy index, which is high (ΔdM 33.6%), as expected. Its pore-size distribution is unimodal in the 100–300 μm range (Fig. 5), affording the stone high resistance to frost and salt crystallization.

Among the various types of flint quarried from the Madrid Tertiary Basin, the data for the black variety are given in Table 1. This is the highest quality flint; it has a mosaic-like texture with crypto- to microcrystalline quartz ranging from 20 to 30 μm in size and the porosity is partially cemented with larger quartz crystals. The absence of opal affords the flint greater stability and strength. Thereby, it has high ultrasound velocity (5671±85 m s⁻¹) and low water absorption (0.6±0.1%) and anisotropy indices (ΔdM 1.1% and Δdm 1.9%). As this stone shows a unimodal pore-size distribution and it mainly is in the 0.01–0.3 μm range (Fig. 5), this black flint is not vulnerable to the effects caused by water absorption processes.

Conclusions

The choice of building stone in Madrid and its variation over time are determined by availability, proximity, ease of quarrying and workability of the stone. Moreover, they are also conditioned by inland connections, the available means and routes for transportation, and the history of fashions, trends and taste. Last but not least, the properties of the materials determine their alterability or durability. The building stones shaping the city of Madrid until the nineteenth century can be summarized as follows.

Flint was used primarily in early constructions for its high strength, being used to build the Arabian city walls (ninth century), and its proximity, as it was quarried from the hills located within the city itself (Madrid's Tertiary Basin). Its excellent durability is attested to by its performance as a construction material for more than 10 centuries.

Granite (Berroqueña stone) was first quarried in the eleventh century from the Guadarrama Mountain Range (Spanish Central System) and became especially popular in the city during the sixteenth century. Monzogranites were quarried in the Zarzalejo area

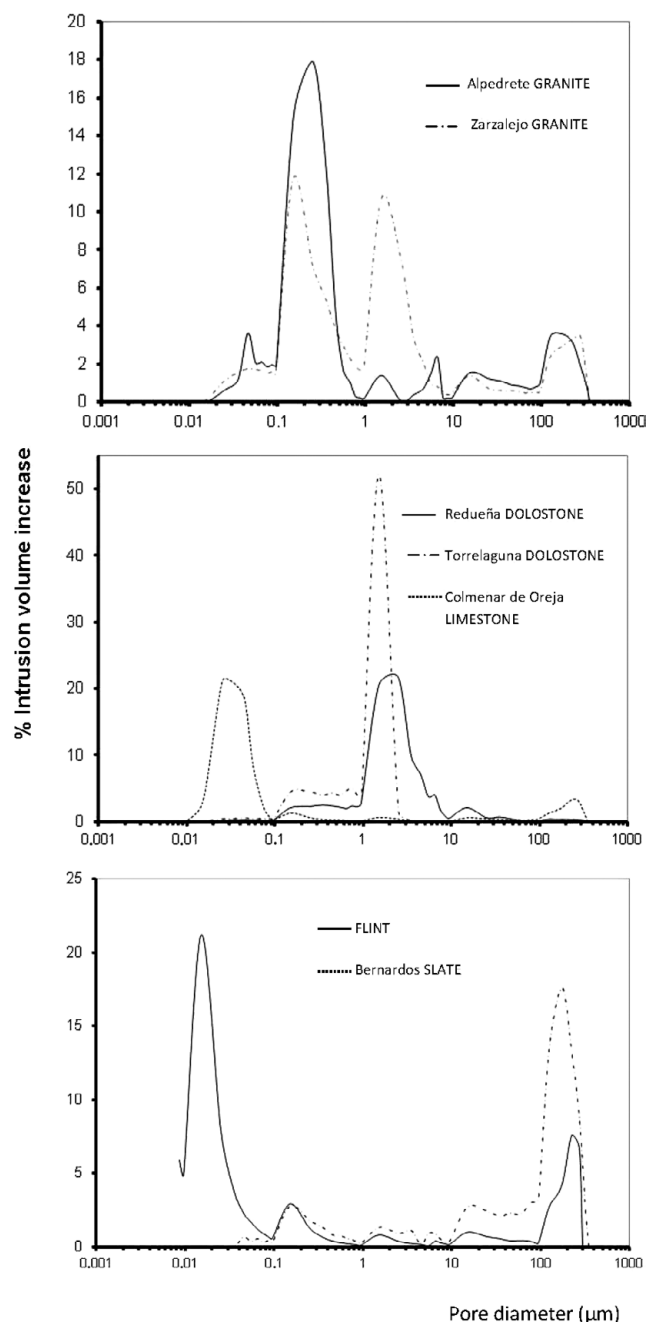


Fig. 5. Pore-size distribution curves of the traditional building materials of Madrid.

and later in the Alpedrete area, which is located closer to the city. Alpedrete stone has proven to be a more durable construction granite than the Zarzalejo variety, owing primarily to its smaller crystal size and lower biotite content.

Cretaceous rocks (limestones and dolostones; Redueña stone) were also first used in the city at the beginning of the eleventh century, largely to replace flint, and were used until the eighteenth century, when they were replaced by Miocene limestone (Colmenar stone). From its petrophysical properties, the dolostone from Torrelaguna was found to be more durable than the stone quarried at Redueña. Miocene limestone started to be used in the capital in the eighteenth century, primarily to build the Royal Palace. The combination of this limestone and Berroqueña stone was to become a characteristic feature of Madrilenian architecture.

Bernardos slate, from the nearby province of Segovia, was the material of choice for roofing emblematic buildings in the capital city after it had been successfully used in the El Escorial Monastery. Despite its quality and durability, its use was interrupted after the nineteenth century, mainly because of high shipping costs and new architectural fashions.

The petrophysical properties that characterize the new construction stones that began to arrive in Madrid with the opening of Spain's first railway, in the middle of the nineteenth century, were very different from those of the traditional stone.

Traditional stone must be used cautiously in restoration work, especially where quarried from the original sites, for building stone is a non-renewable resource. An understanding of such stone and how and where it was quarried, transported and traded constitutes a valuable heritage and historical resource that may be used to design more sustainable building strategies for the future.

Acknowledgements. This research was funded by the Geomaterials (S2009/MAT_1629) and CONSOLIDER-TCP (CSD2007-0058) research programmes, and by the Complutense University of Madrid's research group on the alteration and conservation of heritage stone (921349). The support provided by PICATA postdoctoral fellowship of the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM, CSIC) is also acknowledged. Special thanks are also given to the reviewers, as their comments have substantially improved the paper.

References

- ALONSO, A. 1981. *El Cretácico de la provincia de Segovia (borde norte del Sistema Central)*. Seminarios de Estratigrafía, 7. Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid.
- ALONSO, F.J., ESBERT, R.M. & ORDAZ, J. 1987. Comportamiento hídrico de calizas y dolomías. *Boletín Geológico y Minero*, **XCVIII**, 555–576.
- ALONSO, F., RUBIO, F.J., MARTÍN PARRA, L.M. & RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L.R. 2005. Nuevos datos sobre la estratigrafía del Ordovícico y estructura varisca en el Macizo de Santa María la Real de Nieva. *Geogaceta*, **37**, 39–42.
- ALONSO OTERO, F. 1988. Una calzada madrileña. *El Miliario Extravagante*, **17**, 9–11.
- ALVES, C., SEQUEIRA, M.A. & HAMMECKER, C. 1996. Water transfer and decay of granitic stones in monuments. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série IIa*, **323**, 397–402.
- BELL, F.G. 1993. Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, **21**, 187–200.
- BENAVENTE, D., GARCÍA DEL CURA, M.A., FORT, R. & ORDÓÑEZ, S. 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, **74**, 113–127.
- BUSTILLO, M.A., FORT, R. & BUSTILLO, M. 1993. Specific surface area and ultramicroporosity in polymorphs of silica. *European Journal of Mineralogy*, **5**, 1024–1034.
- BUSTILLO, M.A., PÉREZ-JIMÉNEZ, J.L. & BUSTILLO, M. 2012. Geochemical characterization of sedimentary rocks formed by silicification as supply source of lithic tools (Miocene, Madrid basin). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **29**, 233–247.
- CALLEJA, L. & MONTOTO, M. 1982. Influencia de la microfisuración en las propiedades físicas del granito de Morgadanes. Interpretación petrofísica. *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, **12**, 99–105.
- CALVO, J.P., ORDÓÑEZ, S., HOYOS, M. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1984. Caracterización sedimentológica de la Unidad Intermedia del Mioceno de la zona sur de Madrid. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, **2**, 145–176.
- CALVO, J.P., ALONSO ZARZA, A.M. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1989. Models of Miocene marginal lacustrine sedimentation in response to varied depositional regimes and source areas in the Madrid Basin (Central Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **70**, 199–214.
- DAPENA, E., ORDÓÑEZ, S. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1989. Estudio de las rocas calizas utilizadas durante los siglos XVIII y XIX en la construcción de Palacios de Madrid. *Ingeniería Civil*, **71**, 67–77.
- DELGADO RODRIGUES, J. 2001. Swelling behaviour of stones and its interest in conservation. An appraisal. *Materiales de Construcción*, **51**, 183–195.
- DOBLAS, M., UBANELL, A. & VILLASECA, C. 1988. Deformed porphyry dikes in the Spanish Central System. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, **43**, 517–524.

- DREESSEN, R. & DUSAR, M. 2004. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): Role of petrography in provenance and durability assessment. *Materials Characterization*, **53**, 273–287.
- ESBERT, R.M., ORDAZ, J., ALONSO, F.J., MONTOTO, M., GONZÁLEZ LIMÓN, T. & ALVAREZ DE BUERGO, M. 1997. *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Manuals de Diagnosi*, 5. Col·legi d'Àparelladors i arquitectes tècnics, Barcelona.
- FOLK, R.L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *AAPG Bulletin*, **43**, 1–38.
- FOLK, R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. In: HAM, W.E. (ed.) *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, Memoirs, **1**, 62–84.
- FORT, R., BERNABEU, A., GARCÍA DEL CURA, M.A., LÓPEZ DE AZCONA, M.C., ORDÓÑEZ, S. & MINGARRO, F. 2002. Novelda stone: Widely used within the Spanish architectural heritage. *Materiales de Construcción*, **52**, 19–32.
- FORT, R., FERNÁNDEZ-REVUELTA, B., VARAS, M.J., ALVAREZ DE BUERGO, M. & TABORDA, M. 2008. Effect of anisotropy on Madrid-region Cretaceous dolostone durability in salt crystallization processes. *Materiales de Construcción*, **58**, 161–177.
- FORT, R., ALVAREZ DE BUERGO, M., PEREZ-MONSERRAT, E. & VARAS, M.J. 2010. Monzogranitic batholiths as a supplying source for the heritage construction in the northwest of Madrid. *Engineering Geology*, **115**, 149–157.
- FORT, R., VARAS, M.J., ALVAREZ DE BUERGO, M. & FREIRE, D.M. 2011. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. *Journal of Geophysics and Engineering*, **8**, 132–144.
- GARCÍA DEL CURA, M.A., ORDÓÑEZ, S., DAPENA, E. & GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. 1994. Las canteras de calizas de los interfluvios de los ríos Jarama–Tajuña–Tajo en la Comunidad de Madrid: Valoración de recursos. *Boletín Geológico Minero*, **105**, 56–72.
- GOMEZ-HERAS, M. & FORT, R. 2003. Supplying of masonry material in the construction of the crypt of Santa María la Real de la Almudena, Madrid, Spain, 1883–1911. In: HUERTA, S. (ed.) *Proceedings of the First International Congress on Construction History, II*, Instituto Juan de Herrera, ETS Arquitectura, Madrid 1051–1061.
- GOMEZ-HERAS, M. & FORT, R. 2004. Location of quarries of non-traditional stony materials in the architecture of Madrid: The Crypt of Catedral de Santa María la Real de la Almudena. *Materiales de Construcción*, **54**, 33–48.
- GOMEZ-HERAS, M., SMITH, B.J. & FORT, R. 2006. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology*, **78**, 236–249.
- GOMEZ-HERAS, M., SMITH, B.J. & FORT, R. 2008. Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty. *Environmental Geology*, **56**, 547–560.
- GOMEZ-HERAS, M., SMITH, B.J. & VILES, H.A. 2010. Oxford stone revisited: causes and consequences of diversity in building limestone used in the historic centre of Oxford, England. In: PRIKRYL, R. & TÖRÖK, Á. (eds) *Natural Stone Resources for Historical Monuments*. Geological Society, London, Special Publications, **333**, 101–110.
- GUYDADER, J. & DENIS, A. 1986. Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers. *Bulletin of Engineering Geology*, **33**, 49–55.
- HAYNES, J.M. 1973. Determination of pore properties of constructional and other materials. General introduction and classification of methods. *Materiaux et Constructions, Bulletin RILEM*, **6**, 169–174.
- HIRSCHWALD, J. 1908. *Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit*. Ernst, Berlin.
- JIMÉNEZ GONZÁLEZ, I. 2008. *Efectos de los ciclos de humedad–sequedad en el deterioro de rocas ornamentales que contienen minerales de arcilla*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- LÓPEZ-ARCE, P., VARAS-MURIEL, M.J., FERNÁNDEZ-REVUELTA, B., ÁLVAREZ DE BUERGO, M., FORT, R. & PEREZ-SOBA, C. 2010. Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: Surface roughness quantification. *Catena*, **83**, 170–185.
- MENDUÑA, J. & FORT, R. 2005. *Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XVIII*. IGME, Madrid.
- MENÉNDEZ MARTÍNEZ, J.M., ARBAIZAR GONZÁLEZ, S., FONTANALS PÉREZ DE VILLAMIL, A. & SÁNCHEZ LÁZARO, T. 1996. *Evolución histórica de los itinerarios del Noroeste en la Comunidad de Madrid*. Consejería de Transportes, Comunidad de Madrid.
- MOLINA, E., CULTRONE, G., SEBASTIÁN, E., ALONSO, F.J., CARRIZO, L., GISBERT, J. & BUI, O. 2011. The pore system of sedimentary rocks as a key factor in the durability of building materials. *Engineering Geology*, **118**, 110–121.
- MONTOTO, M. 1983. Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks. In: *5th International Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Melbourne, B, International Society for Rock Mechanics, Lisbon, 93–98.
- MORENO, F., VILELA, S.A.G., ANTUNES, A.S.G. & ALVES, C.A.S. 2006. Capillary-rising salt pollution and granitic stone erosive decay in the parish church of Torre de Moncorvo (NE Portugal)—implications for conservation strategy. *Journal of Cultural Heritage*, **7**, 56–66.
- OLIVER DOMINGO, J.L., (translator) 1997. *The 10 Books of Architecture, Vitruvius*. Alianza, Madrid [in Spanish].
- ORDÓÑEZ, S., GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1984. *Carbonatos fluviales en la Mesa Ocaña–Tarancón*. *Acta Salmanticensia*, **II**, 277–298.
- ORDÓÑEZ, S., FORT, R. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1997. Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **30**, 221–230.
- PÉREZ ORTIZ, A., ORDAZ, J., ESBERT, R.M. & ALONSO, F.J. 1994. Microfissuring evolution of the granite from the Axeitos dolmen along the salt crystallization test. In: FASSINA, V., HEINRICH, O. & ZEZZA, F. (eds) *The conservation of monuments in the Mediterranean basin: stone and monuments, methodologies for the analyses of weathering and conservation: proceedings of the 3rd international symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. Soprintendenza ai beni artistici e storici di Venezia, Venice.
- PERIS MORA, E. 2007. Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment*, **42**, 1329–1334.
- PUNURU, A.R., CHOWDHURY, A.N., KULSHESHTHA, N.P. & GAURY, K.L. 1990. Control of porosity on durability of limestones at the Great Sphinx, Egypt. *Environmental Geology and Water Sciences*, **15**, 225–232.
- RICHARDSON, B.A. 1991. The durability of porous stones. *Stone Industries*, **26**, 22–25.
- ROSSI-MANARES, R. & TUCCI, A. 1989. Pore structure and salt crystallization: 'salt decay' of Agrigento biocalcarene and case hardening in sandstone. In: ZEZZA, F. (ed.) *Proceedings of 1st International Symposium, The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Grafo Edizioni, Brescia, 97–100.
- RUSSELL, S.A. 1927. *Stone Preservation Committee Report (Appendix I)*. HMSO, London.
- SANZ, E. 1996. *Sedimentología de las formaciones neógenas del sur de la Cuenca de Madrid*. Monografías CEDEX. Madrid.
- SOUSA, L.M.O., SUÁREZ DEL RÍO, L.M., CALLEJA, L., RUIZ DE ARGANDOÑA, V.G. & RODRÍGUEZ REY, A. 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, **77**, 153–168.
- TÖRÖK, Á. & VÁSÁRHELYI, B. 2010. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, **115**, 237–245.
- TSUI, N., FLATT, R.J. & SCHERER, G.W. 2003. Crystallization damage by sodium sulphate. *Journal of Cultural Heritage*, **4**, 109–115.
- VÁZQUEZ MENÉNDEZ, P. 2010. *Granitos ornamentales: Caracterización, durabilidad y sugerencias de uso*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.
- VENIALE, F., SETTI, M., RODRÍGUEZ-NAVARRO, C. & LODOLA, S. 2001. Procesos de alteración asociados al contenido de minerales arcillosos en materiales pétreos. *Materiales de Construcción*, **51**, 163–182.
- VICENTE, M.A. 1996. The role of salt crystallization in the degradation processes of granite monuments. In: Zezza, F. (ed.) *Origin, mechanism and effects of salts on degradation of monuments in marine and continental environments*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 147–155.
- VILLASECA, C., BARBERO, L. & ROGERS, G. 1998. Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: Petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints. *Lithos*, **43**, 55–79.
- VILLASECA, C., BELLIDO, F., PEREZ-SOBA, C. & BILLSTROM, K. 2009. Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt. *Mineralogy and Petrology*, **96**, 197–211.
- VOLERY, C., DAVAUD, E., FOUBERT, A. & CALINE, B. 2010. Lacustrine microporous micrites of the Madrid Basin (Late Miocene, Spain) as analogues for shallow-marine carbonates of the Mishrif reservoir Formation (Cenomanian to Early Turonian, Middle East). *Facies*, **56**, 385–397.
- WRIGHT, V.P. & ALONSO ZARZA, A.M. 1990. Pedostratigraphic models for alluvial fan deposits: A tool for interpreting ancient sequences. *Journal of the Geological Society, London*, **147**, 8–10.
- WRIGHT, V.P., ALONSO ZARZA, A.M., SANZ, M.E. & CALVO, J.P. 1997. Diagenesis of Late Miocene micritic lacustrine carbonates, Madrid Basin, Spain. *Sedimentary Geology*, **114**, 81–95.



The
Geological
Society

serving science & profession

TAKE THAT NEXT STEP TO FAST TRACK YOUR CAREER...BECOME A **CHARTERED GEOLOGIST** OR **CHARTERED SCIENTIST**

- A peer reviewed process which requires a high standard of knowledge, competence and professionalism
- The hallmark of professional achievement, recognised in the UK and in an expanding number of countries
- Identifies you as competent and professional in your chosen speciality, and binds you to an enforced Code of Conduct
- Recognises your achievement within your industry and among your peers
- In some sectors Chartered Geologists can sign off legal papers and reports
- Chartered Geologist makes you eligible to apply for the title of European Geologist

Contact us today and request an information pack to charter your flight to success

www.geolsoc.org.uk/chartership

Fellowship Department, The Geological Society, Burlington House, Piccadilly, London W1J 0BG

Tel: 020 7434 9944 Fax: 020 7439 8975

Email: enquiries@geolsoc.org.uk



6.2 Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone.

Journal of Geophysics and Engineering, 8: 132-144. doi:10.1088/1742-2132/8/3/S13. 2011

Fort, R., Varas Muriel, M.J., Álvarez De Buergo Ballester, M. y **Freire-Lista, D.M.**

La anisotropía es una propiedad petrofísica e intrínseca de los materiales que permite definir su calidad así como su resistencia a los procesos de deterioro. Se aborda el estudio de seis índices de anisotropía distintos para establecer el grado de anisotropía que presentan nueve variedades de piedra natural, cuatro de ellas granitos, ampliamente utilizadas en el patrimonio construido de España. Aunque todos estos índices reflejan bien la anisotropía de los materiales, son los índices dM y dm los que mejor permiten valorar esta propiedad, proponiéndose en este trabajo otro índice (dMm), relacionado con los dos anteriores. La utilización de estos índices ha posibilitado definir diferentes grados de anisotropía (clases de anisotropía) para cada una de las variedades petrológicas consideradas, lo que permite explicar el deterioro diferencial que se observa para un mismo tipo de roca extraída de una misma cantera y que puede influir decisivamente en su durabilidad una vez puesto en obra.

Los resultados obtenidos indican que entre las rocas graníticas ensayadas son los granitos de Alpedrete y Colmenar Viejo los que presentan menor anisotropía y, por consiguiente, un mejor comportamiento hídrico. Por el contrario, el granito de Cadalso de los Vidrios y de Zarzalejo tiene un peor comportamiento hídrico al presentar mayor anisotropía.

Como conclusión final, se establece la importancia de conocer la anisotropía de la piedra natural que se va a utilizar en restauración o en obra nueva, ya que una adecuada selección de la calidad de los materiales asegurará una mayor resistencia a los procesos de deterioro y, por lo tanto, una mayor durabilidad. Por ello, es aconsejable seleccionar materiales con el menor grado de anisotropía posible, ya que la anisotropía influye en la resistencia del material a la acción del agua, presentando un comportamiento hídrico peor cuanto mayor sean los valores de anisotropía.

Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

2011 J. Geophys. Eng. 8 S132

(<http://iopscience.iop.org/1742-2140/8/3/S13>)

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

IP Address: 147.96.24.91

This content was downloaded on 01/10/2015 at 14:48

Please note that [terms and conditions apply](#).

Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone

R Fort¹, M J Varas^{1,2}, M Alvarez de Buergo^{1,2} and D Martín-Freire^{1,2}

¹ Instituto de Geociencias (CSIC-UCM) [Geosciences Institute. Spanish Research Council (CSIC) and Complutense University of Madrid (UCM)], Madrid, Spain

² Departamento de Petrología [Petrology Department], School of Geology, Complutense University of Madrid (UCM), Madrid, Spain

E-mail: alvarezm@geo.ucm.es

Received 30 November 2010

Accepted for publication 8 July 2011

Published 23 August 2011

Online at stacks.iop.org/JGE/8/S132

Abstract

Anisotropy is a petrophysical property of natural stone and other construction materials that determines their quality and resistance to decay due to a variety of agents, such as water. A study was conducted on nine types of stone widely used in Spain's built heritage, using six previously defined anisotropy indices. These indices can be used to determine the degree of anisotropy, which helps explain the differential decay observed in stone materials quarried in the same bed and used to build the same structure. The conclusion reached is that anisotropy should be determined in the natural stone used both to restore the architectural heritage and in new construction, since the appropriate choice of material quality ensures greater resistance to decay and, therefore, increased durability. Materials with the lowest possible anisotropy should be selected, as this property governs their hydraulic behaviour: the lower the anisotropy in a material, the better its behaviour in relation to water and the longer its durability.

Keywords: limestone, dolostone, slate, granite, capillary absorption, ultrasound velocity, anisotropy

1. Introduction

All kinds of natural stone used in construction have certain properties that vary according to the direction in which they are measured; in other words, they are anisotropic. A variety of causes of anisotropy in rock can be identified, including crystal and grain orientation, the accumulation of minerals, stratification and lamination, stress orientation and the number and orientation of pores and cracks. Anisotropy, which depends on composition, texture and structure (Takemura *et al* 2003, Guéguen and Schubnel 2003), is thus directly related to the origin of rocks and any subsequent alteration.

Every type of rock (granite, limestone, slate, marble) has its own level of anisotropy. Ascertaining anisotropy in natural stone and how it develops is of utmost importance, since this information is essential to determine (a) how it should be quarried and most efficiently processed, (b) the quality of the stone products and their suitability for use as ashlar or ornamental elements and (c) its placement on buildings. This

is why the use of natural stone in construction is influenced by its anisotropy index. Likewise, the directions of anisotropy have a bearing on stone material decay and consequently on its quality and durability (Sheremeti-Kabashi and Snethlage 2000, Fernandez-Revuelta *et al* 2008, Fort *et al* 2008). These issues must be considered when planning restoration work on the architectural heritage, or when a certain type of natural stone is to be used for structural, aesthetic or insulation purposes in new construction, whether of buildings or civil works.

One of the most suitable techniques for determining anisotropy in materials is ultrasonic measurement. Ultrasonic waves propagate inside the stone at different velocities, depending on direction. Ultrasonic techniques are used to study the physical and mechanical properties of natural stone and other construction materials to characterize the materials (Zezza 1990, Fort *et al* 2002, Prikryl *et al* 2007, Del Rio *et al* 2006, Buj and Gisbert 2007, Sheremeti-Kabashi and Snethlage 2000, Fort *et al* 2007, García del Cura *et al* 2008, Fort *et al*

2010a), evaluate and quantify their decay (Sousa *et al* 2005, Weiss *et al* 2000, Yavuz *et al* 2006, Esbert 2007), assess the effectiveness of consolidants (Sebastian *et al* 1999, Myrin and Malaga 2006), determine the compatibility between original and replacement materials, especially when they are adjacent (Varas *et al* 2008), and establish the origin of materials used in historic buildings (Dreesen and Duser 2004, Gomez-Heras and Fort 2004). The effect of anisotropy on resistance to deformation and to mechanical failure in stone has also been widely studied (Prikryl *et al* 2007, Vasconcelos *et al* 2008).

Benson *et al* 2005 used the propagation velocity of ultrasonic waves to evaluate the effect of the pore system on anisotropy in different types of sandstone. The anisotropy of natural stone governs its hydraulic properties, especially those with a strong directional component, such as capillary water absorption and permeability (Hammecker *et al* 1993, Zhang and Sanderson 1995, King 2002, Cueto *et al* 2009, Fort *et al* 2010b).

Anisotropy of wave propagation essentially means that wave velocity depends on direction; for geological materials, such preferred directions are either a result of the way the stone was laid or determined by external conditions.

A number of analysis and testing methods and conditions are in place to determine rock anisotropy using ultrasound. The shape of the specimens may vary, for example; in addition to the more common cylindrical or parallelepiped specimens, polyhedra or spheres have also been used to measure the propagation velocity of ultrasound waves in the largest possible number of directions, although this renders the study of anisotropy in stone materials more complex.

This study aimed at comparing the anisotropy indices in several types of rock that are representative of natural stone as a whole to determine the advantages and drawbacks of each. The effect of the degree of anisotropy (anisotropic classes) on the hydraulic behaviour of the materials was also analysed.

2. Methods

In this study, nine types of natural stone traditionally used in the architectural heritage of Madrid, Spain, were selected from the three major groups of ornamental rock (granite, slate and marble). Four types of granite (Alpedrete, Zarzalejo, Colmenar Viejo and Cadalso de los Vidrios), three carbonate rocks (dolostone from Redueña and Torrelaguna and limestone from Colmenar de Oreja) and two types of slate (Bernardos and Sierra Negra) were chosen (figure 1). With the exception of the Redueña and Torrelaguna facilities, which closed down in the mid-20th century, the quarries supplying this building stone are still operating, although some more intensely than others.

The petrographic analysis of the stone materials was performed on an Olympus BX51 polarized optical microscope fitted with an Olympus DP12 digital camera. The granite samples were stained with cobaltinitrite to distinguish the potassium feldspars from the plagioclases, and the carbonate rocks were partially stained with alizarin red to distinguish the calcitic from the dolomitic components.

The mineral phases were determined by XRD of the powder fraction from the entire sample on a Philips Analytical PW 1752 diffractometer operated at 40 kV and 30 mA, equipped with a copper K-alpha anode tube, graphite monochromator and PC-ADP diffraction software. Measurements were taken in the 2–65° range at a step size of 0.02°, and 2° min⁻¹ in continuous mode.

Several blocks of these materials were taken from each of the quarries, and cubic specimens measuring 50 ± 5 mm on each side were cut from them. Specimen length was measured in the three orthogonal directions with a Mitutoyo digital calliper with a precision of ±0.01 mm. Four measurements were taken in each of the three directions, and averaged.

In each of these specimens, the ultrasound propagation velocity was measured in direct transmit/receive mode (transducers facing each other on opposite sides of the cubic specimen), and in the three spatial directions (*xyz*). Measurements were taken after the specimens were dried in an oven at 65 °C to a constant weight (when the difference between two consecutive measurements, taken 24 h apart, was Δ ≤ 1‰).

CNS Electronics PUNDIT test equipment, with a precision of ±0.1 μs, was used for the ultrasonic measurements. The system included transducers with a frequency of 1 MHz and a flat, round contact surface (11.82 mm in diameter). A water and carboxymethylcellulose paste (Sichozell Kleister brand, by Henkel) was used to improve and increase the contact and bond between the stone surface and the transducer.

Material anisotropy can be determined by measuring the propagation velocity of ultrasound or P waves (V_p) in different directions in space. In this study, the anisotropy indices were found from the ultrasound propagation velocities measured in the materials under analysis. The indices proposed by Birch (1961), Guydader and Denis (1986), Schön (1996) and Ruedrich and Siegesmund (2007) were used, as shown below.

$$k = ((V_{p_{\max}} - V_{p_{\min}})/V_{p_{\text{mean}}}) \times 100 \quad [1] \text{ (Birch 1961)}$$

Av (anisotropy coefficient) or AS =

$$((V_{p_{\max}} - V_{p_{\min}})/V_{p_{\min}}) \times 100 \quad [2] \text{ (Schon 1996)}$$

$$\text{ARS} = ((V_{p_{\max}} - V_{p_{\min}})/V_{p_{\max}}) \times 100$$

[3] (Ruedrich and Siegesmund 2007)

$$\text{AD} = V_{p_{\min}}/V_{p_{\max}}$$

[4] (Schon 1996, Benavente *et al* 2007)

$$\text{dM}\% = [1 - (2V_{p_{\min}} / (V_{p_{\text{mean}}} + V_{p_{\max}}))] \times 100$$

[5] (Guydader and Denis 1986)

$$\text{dm}\% = [(2 \times (V_{p_{\max}} - V_{p_{\text{mean}}}) / (V_{p_{\text{mean}}} + V_{p_{\max}}))] \times 100$$

[6] (Guydader and Denis 1986).

The three velocities shown in the anisotropy calculations refer to the velocities found for the three orthogonal directions in space: V_{p_{max}} is the mean maximum velocity obtained in any one of those directions, V_{p_{min}} is the mean minimum velocity and V_{p_{mean}} is the intermediate value. All authors include V_{p_{max}} and V_{p_{min}} in their anisotropy calculations, i.e. two of the three axes in space, while others include V_{p_{mean}} to take all three axes, rather than just two, into consideration.

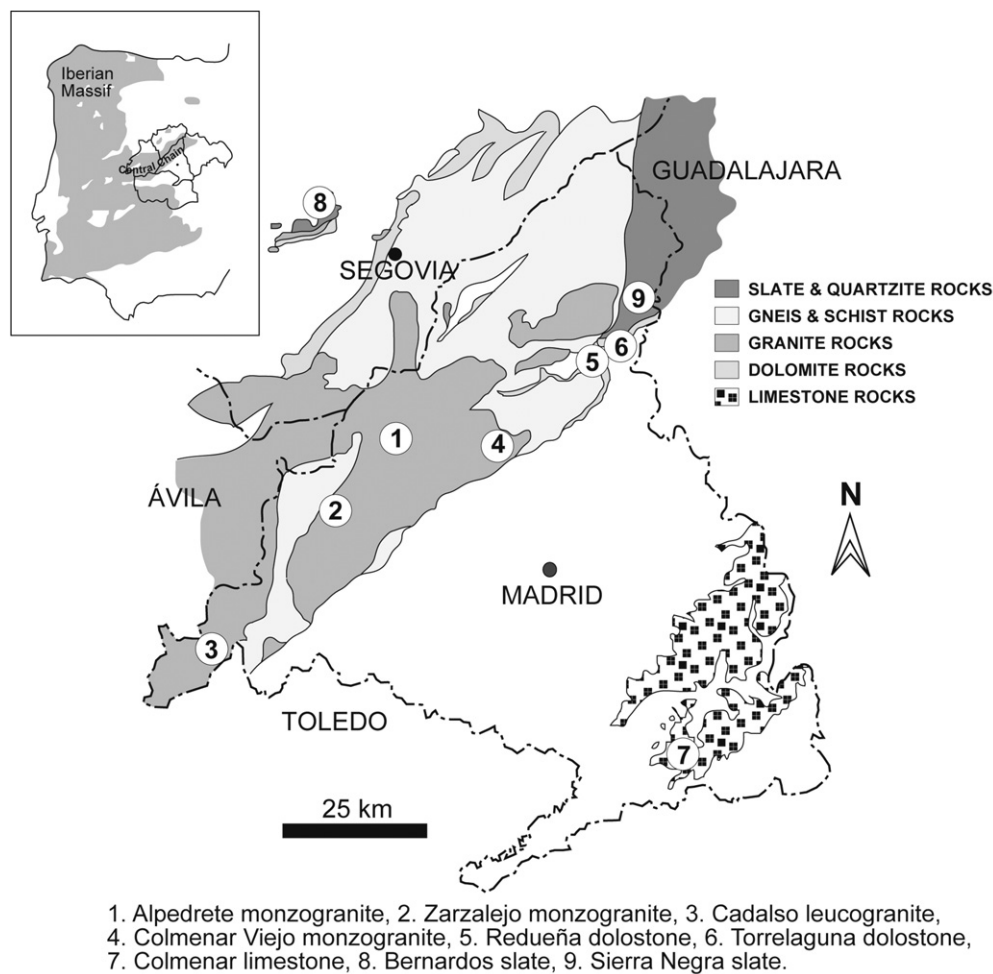


Figure 1. Location of the different analyzed lithotypes in a geological scheme of central Spain.

This latter was the criterion applied by Guyader and Denis (1986) in their definition of anisotropy; in total anisotropy (dM%), they took the three spatial axes into consideration, while in relative anisotropy (dm%) they used only two, excluding the axis for which the smallest V_p value was found. These two indices furnish complementary information, as each indicates the direction in space in which the structural, textural or mineralogical orientation that determines anisotropy in a material is concentrated. Therefore, these indices (dM and dm) provide more information than the others listed above.

The data were then statistically processed using cluster analysis (*k*-means clustering as per Khan and Ahmad (2004)) to establish groups or classes of anisotropy for each type of material. The number of classes was established such that each group comprised a minimum of eight specimens to ensure that the values of the stone hydraulic and durability parameters determined were representative (Fort *et al* 2008, Fernandez-Revuelta *et al* 2008, López-Arce *et al* 2010).

Nearly 800 (787) specimens were analysed, and over 300 (329) selected for hydraulic characterization testing in accordance with the Spanish and European (UNE-EN) standards in effect for natural stone (AENOR 1999, 2002): bulk density and effective porosity (UNE-EN 1936:1999), water absorption at atmospheric pressure (UNE-EN 13755:2002) and capillary absorption of water (UNE-EN

1925:1999). These were regarded to be the most suitable tests for determining the physical and hydraulic properties of the stone materials.

Two specimens of each type of stone were selected for the capillary water uptake test (UNE EN 1925:1999) according to the following criteria: the specimens had different degrees of anisotropy, so that one would show simultaneously high, and the other simultaneously low, values in both anisotropy indices. The test was performed in the directions defined by the maximum and minimum ultrasound propagation velocity, which would be parallel and perpendicular to the discontinuity planes causing the anisotropy ($V_p \parallel$ and $V_p \perp$).

3. Materials: petrological and mineralogical characteristics

The quarries from which the materials analysed were extracted are located in the region of Madrid, except for the Bernardos slate quarry in the province of Segovia, located 120 km north-northwest of Spain's capital (figure 1).

3.1. Granitic rocks

While the widespread use of granite for building in Madrid dates back to the 12th century, it underwent a boom beginning

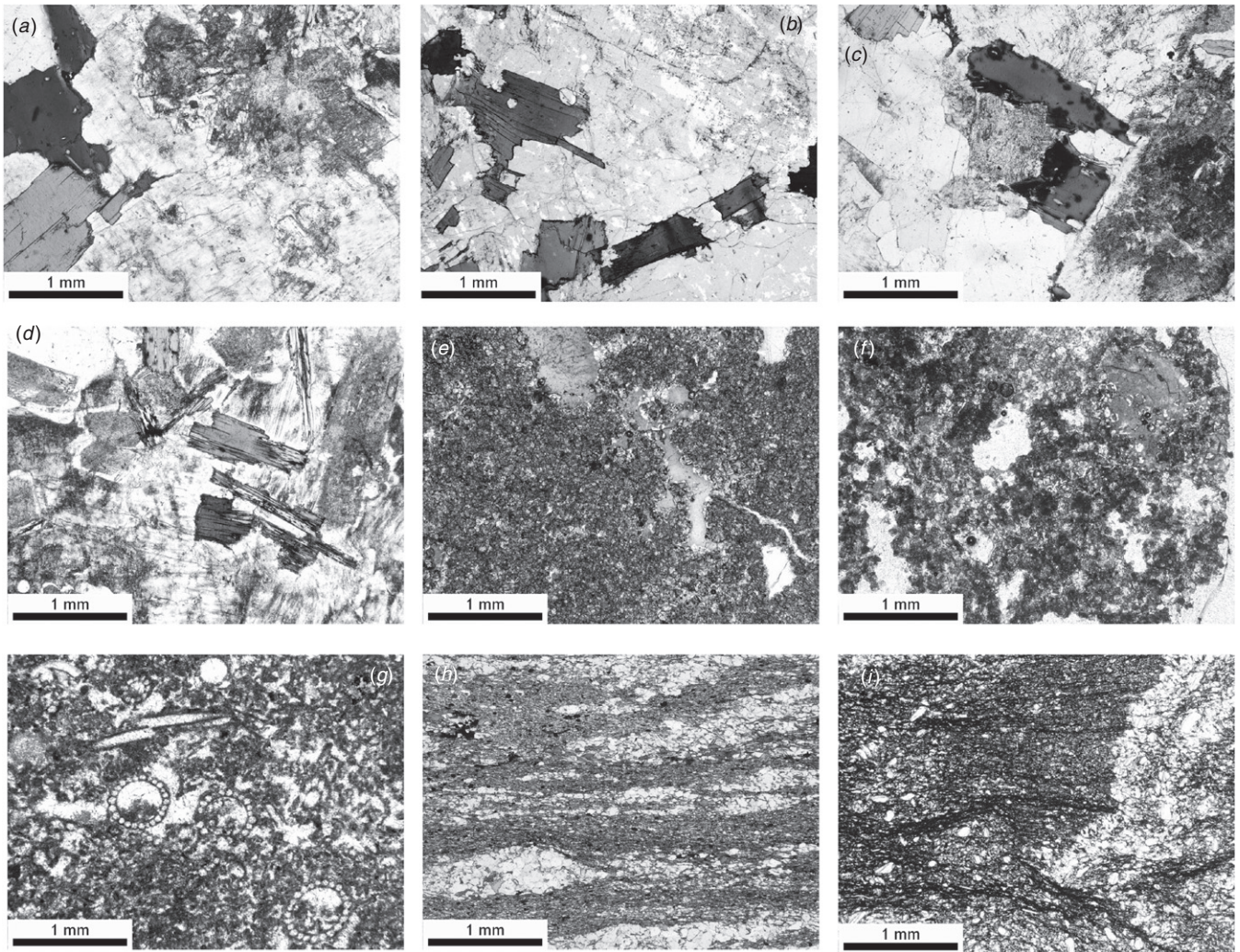


Figure 2. Micrographs at the polarized optical microscope of thin sections from the nine stone materials studied. (a) Alpedrete granite, (b) Zarzalejo granite, (c) Cadalso granite, (d) Colmenar Viejo granite, (e) Torrelaguna dolostone, (f) Redueña dolostone, (g) Caliza de Colmenar limestone, (h) Bernardos slate, (i) Sierra Negra slate.

in the 16th century, when the Royal Monastery of El Escorial was built and the capital of the Kingdom of Spain was moved to Madrid in 1561. This type of stone was used for many of the city's most emblematic buildings and monuments (such as the Royal Palace), and even for recent constructions (the Nuevos Ministerios government complex and the Bank of Spain enlargement, to name two). The Sierra de Guadarrama Mountains are dotted with quarries, encompassing batholiths of peraluminous granites ranging from monzogranites to leucogranites (González Casado *et al* 1996, Villaseca *et al* 1998).

3.1.1. Alpedrete granite. This granitoid is classified as a medium-grained subidiomorphic, equigranular monzogranite containing quartz (crystal size 2–3 mm and 55–60% vol.), plagioclase (1–3 mm and 20–23% vol.), potassium feldspar (microcline; 2–4 mm and 7–10% vol.) and biotite (1–2 mm and 10–15% vol.). Its accessory minerals are cordierite, apatite, zircon and monazite. The plagioclase is idiomorphic and zonal and exhibits albite twinning, while the

potassium feldspar is subidiomorphic–allotriomorphic and has a poikilotopic texture and perthitic exsolutions. The quartz is globular and markedly heterometric, with fluid inclusions (figure 2(a)).

3.1.2. Zarzalejo granite. This granite is subidiomorphic, equigranular monzogranite, coarse-grained and grey in colour. It contains quartz (2–5 mm and 60% vol.), plagioclase (3–4 mm and 15–18% vol.), potassium feldspar (4–6 mm and 7–10% vol.) and biotite (2–3 mm and 15% vol.). The most significant accessory minerals are apatite, zircon, opaque minerals and monazite. The plagioclase has heterometric crystals, complex zoning, a low level of seritization and a tendency to form polycrystalline aggregates. The potassium feldspar is large in size, with a poikilotopic texture and an abundance of perthitic exsolutions. The quartz varies in shape from subidiomorphic to allotriomorphic, and fluid microinclusions are present. The biotite is very abundant and is slightly chloritized, forming polycrystalline aggregates.

This stone is currently marketed under the name Blanco Rafaela (Rafaela White) or Gris Escorial (Escorial Grey) (figure 2(b)).

3.1.3. Cadalso de los Vidrios granite. This is a medium-grained, equigranular leucogranite with a uniform composition, comprising quartz (2–4 mm and 50–55% vol.), plagioclase (1–3 mm and 20–25% vol.), potassium feldspar (2–4 mm and 20–25% vol.), and in a smaller proportion, biotite (1 mm and 5% vol.). Accessory minerals are zircon, apatite, monazite, sphene, ilmenite, allanite and some opaque minerals. The biotite, present in very small quantities, is somewhat chloritized, forming polycrystalline aggregates. The plagioclase ranges from idiomorphic to subidiomorphic and is slightly seritized and zonal, with polysynthetic twinning (albite). The potassium feldspar is subidiomorphic and albitized, with poikilotopic textures and Carlsbad twinning. The quartz is subidiomorphic with fluid inclusions. This granite is sold under the name Blanco Cristal (Crystal White) (figure 2(c)).

3.1.4. Colmenar Viejo granite. This is a medium-coarse-grained, heterogranular, leucocratic monzogranite with potassium feldspar (5–6 mm and 35–30% vol.), quartz (2–4 mm and 30–40% vol.), plagioclase (2–5 mm and 20–28% vol.), and to a lesser degree, biotite (1–2 mm and 7–10% vol.) in its composition. Present as accessory minerals are cordierite, muscovite, apatite, zircon and opaque minerals. The cordierite is altered to sericite. The potassium feldspars, large in size, vary from idiomorphic to subidiomorphic and appear as porphyries, with Carlsbad twinning, a poikilotopic texture and perthitic exsolutions. The subidiomorphic quartz forms polycrystalline aggregates (figure 2(d)).

3.2. Carbonate rocks

The oldest carbonate rocks used in Madrid are known as Redueña and Torrelaguna stones, from the Upper Cretaceous period. These types of stones were used extensively from the 14th to the 18th century, and were quarried until the mid-20th century. Another stone that has been widely quarried since the 18th century is Colmenar stone or limestone, used in most of the monuments in the central part of the Iberian Peninsula (Dapena *et al* 1989, Fort *et al* 1996).

3.2.1. Redueña stone. This is a dolostone with a massive internal structure formed by rhombic dolomite crystals. Its textural variations are reflected in the domain of two crystal sizes; compacted areas with dark, dirty and altered (opaque cores) microcrystals (15–20 μm) alternate with less compacted areas with clear, clean and zonal mesocrystals (60–150 μm). This latter area is characterized by incipient de-dolomitization (transformation of dolomite to calcite) and high porosity (20–40%). The pores exhibit fairly regular morphology and range in size from 100–200 μm to 7 mm (Fort *et al* 2008) (figure 2(e)).

3.2.2. Torrelaguna stone. This is a massive dolostone formed by rhombic dolomite crystals. It is occasionally banded because remnants of its original depositional texture (stromatolitic structures) are preserved. The crystals are microcrystalline, equigranular (<50 μm) and dark, with few mottled cores. Porosity is very high (>40%), and poikilotopic and blocky mosaic cements predominate. Incipient de-dolomitization can be observed. The presence of localized iron oxyhydroxide deposits gives this stone its reddish colour (Fort *et al* 2008) (figure 2(f)).

3.2.3. Colmenar stone. This is an Upper Miocene limestone from the Madrid sedimentary basin. It is classified as a lacustrine biomicrite/biosparite formed by a bioclast skeleton (40% characeae, ostracods and gastropods) and a paste where the micritic matrix (20–30%) alternates with sparitic cement (30–40%). The micrite is a cryptocrystalline mass, calcitic in composition and dark-coloured. The sparitic cement is a drusy mosaic material. The existence of geopetal fill areas (matrix/cement) is indicative of significant phreatic–vadose conditions in the sedimentary medium (figure 2(g)).

3.3. Metamorphic rocks

3.3.1. Bernardos slates. These slates are extracted from quarries located in the Schist-Greywacke Complex dating from the Precambrian/Lower Cambrian period in the Central Iberian Zone of the Iberian Peninsula (Alonso *et al* 2005).

In construction, they have been mainly and widely used as roofing shingles. They can be found on many emblematic buildings in Madrid dating from the 16th century onwards (Fernández-Revuelta *et al* 2008), as well as elsewhere on and beyond the Iberian Peninsula.

These slates have a visibly uniform texture, although polarized optical microscopy reveals small differences in their particle size distribution related to their mineral composition (quartz 70–55 μm and phyllosilicates <65 μm). The quartz and a small amount of plagioclase (albite) appear both in aggregates and forming fine bands 0.5–1 mm thick, alongside the phyllosilicates, the most predominant group of minerals: biotite, muscovite, chlorite and clinocllore. Apatite, tourmaline, zircon and rutile are accessory minerals (figure 2(h)).

3.3.2. Sierra Negra slates. These slates were extracted from small quarries in the Sierra de Ayllón Mountains, in the easternmost part of the Sistema Central mountain range. They are Silurian in age, folded during the Variscan orogeny and raised during the Alpine orogeny. The use of these materials as roofing shingles and blocks gave rise to a traditional type of architecture in the region, known as ‘black architecture’ or the architecture of the ‘black villages’. This slate is clayey in texture, with a fairly heterogeneous composition and slight foliation. Under a polarized light optical microscope, it is very dark, with irregular, wavy banding. Its mineral composition and grain size vary widely. The average grain size is around 35 μm , and quartz, muscovite, chlorite and some biotite can be detected. Clinocllore, a phyllosilicate is likewise present,

Table 1. Mean values of ultrasound velocity transmission (Vp), bulk density, open porosity and water absorption at atmospheric pressure.

	STONE	Vp (m s ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)	Open porosity (%)	Water absorption (%)
Granites	Alpedrete	4601 ± 204	2669 ± 17	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0.0
	Zarzalejo	3296 ± 198	2662 ± 21	1.6 ± 0.1	0.6 ± 0.0
	Cadalso	3575 ± 178	2599 ± 15	1.2 ± 0.2	0.5 ± 0.1
	Colmenar Viejo	5190 ± 207	2610 ± 22	0.7 ± 0.1	0.3 ± 0.2
Carbonate rocks	Redueña	2753 ± 314	2349 ± 92	16.2 ± 3.4	5.6 ± 1.4
	Torrelaguna	3788 ± 278	2527 ± 38	10.0 ± 1.4	3.3 ± 0.6
	Colmenar	5941 ± 111	2579 ± 30	3.8 ± 1.2	0.8 ± 0.4
Slates	Bernardos	5694 ± 183	2751 ± 7	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.0
	Sierra Negra	3455 ± 461	2598 ± 42	8.2 ± 1.1	2.6 ± 0.4

Table 2. Anisotropic indices of the nine stones analysed: mean, maximum and minimum values.

Stones	Anisotropy indices	k	As	ARS	AD	dM%	dm%
Alpedrete	Mean	6.87	7.18	6.66	0.93	5.78	1.90
granite	Max–min	11.00–2.15	11.76–2.12	10.52–2.14	0.98–0.89	9.38–1.72	8.81–0.02
Zarzalejo	Mean	14.86	16.41	13.97	0.86	12.65	3.08
granite	Max–min	22.32–6.61	25.47–6.88	20.30–6.44	0.94–0.80	18.20–5.70	13.09–0.15
Cadalso	Mean	17.90	20.28	16.656	0.833	15.339	3.173
granite	Max–min	28.98–7.38	34.62–7.68	25.72–7.13	0.93–0.74	23.91–4.65	13.70–0.07
Colmenar	Mean	4.58	4.73	4.45	0.96	3.48	2.05
Viejo granite	Max–min	15.72–0.57	17.05–0.58	14.57–0.57	0.99–0.50	11.25–0.33	8.00–0.02
Redueña	Mean	7.69	8.11	7.32	0.93	5.58	3.85
dolostone	Max–min	16.31–0.41	17.80–0.41	15.11–0.41	1.00–0.85	14.09–0.24	13.39–0.02
Torrelaguna	Mean	7.47	7.88	7.13	0.93	5.61	3.33
dolostone	Max–min	18.02–0.69	20.02–0.69	16.68–0.69	0.99–0.81	14.25–0.42	11.84–0.13
Colmenar	Mean	3.50	3.80	3.62	0.96	3.05	1.19
limestone	Max–min	7.13–0.09	7.33–0.09	6.83–0.09	1.00–0.93	5.23–0.08	5.95–0.01
Bernardos	Mean	41.22	55.97	35.45	0.65	33.59	5.80
slate	Max–min	64.77–33.24	108.40–41.49	52.02–29.32	0.71–0.48	50.27–26.21	44.83–1.23
Sierra	Mean	123.15	440.14	79.63	0.20	76.73	29.23
Negra slate	Max–min	168.92–84.57	997.83–167.98	90.89–62.68	0.37–0.09	88.58–58.88	76.33–2.40

either isolated or in aggregates. Its crystals are not oriented and range in size from 35 to 190 μm (figure 2(i)). This material is also characterized by long parallel cracks, indicative of the plane of foliation.

4. Petrophysical characteristics

Table 1 shows the mean values of the petrophysical characteristics determined for the nine varieties of natural stone analysed. The granites from the westernmost quarries of the Autonomous Community of Madrid, Zarzalejo and Cadalso, exhibited the greatest porosity and lowest Vp, while the granites with the highest Vp values and lowest porosity were found in the northern part of the region, Colmenar Viejo and Alpedrete. Of the carbonate rocks, the Cretaceous dolostones (Redueña and Torrelaguna) had the highest porosity and lowest Vp values, while the Miocene limestones (Colmenar de Oreja) had the highest Vp and lowest porosity.

The Sierra Negra slates exhibited moderate to high porosity (>8%) and a moderate to low Vp value (3455 m s⁻¹), while porosity was very low (0.4%) and the Vp very high (5694 m s⁻¹) in the Bernardos slates.

The sorptivity of these materials varied with their porosity: the higher the porosity, the greater the capacity to absorb water,

although in no case in the stone studied did the absorbed water exceed 6% on average. The Redueña and Torrelaguna dolostones and the Sierra Negra slate were the stones with the highest water sorptivity, while Bernardos slate had the smallest value of all the varieties analysed, followed by the granites (mean water absorption values of <0.7%).

Table 2 shows the mean, maximum and minimum values for each anisotropy index determined and for each variety of stone, disregarding the atypical values. The anisotropy indices revealed differences and similarities among the rocks. The K, As, ARS and dM indices were very similar (table 2) for the stones analysed. The dM index exhibited the lowest values and the As the highest, while the ARS results were the closest to the dM values. The farther these index values from 0, the more anisotropic the materials were. As the AD index ranges from 0 to 1, with 1 indicating isotropic material, its values logically differed from all the others, although its variation was proportional to, albeit in the opposite direction from, the variations recorded in the other indices, and depended on the type of stone.

The correlation coefficient among these indices was generally over 0.95 for all the materials, except for the dm index, where it ranged from 0.1 to 0.65. This was because this index does not take the velocity in the direction of maximum anisotropy (Vp_{min}) into consideration, but only the maximum and mean velocities (Vp_{max} and Vp_{mean}).

The *K*, *As*, *ARS* and *dM* indices were higher for the Zarzalejo and Cadalso than for the Alpedrete and Colmenar granites, while the *AD* index was lower for the former than for the latter group. The Zarzalejo and Cadalso granites were consequently more anisotropic than the Alpedrete and Colmenar Viejo materials.

Of the carbonate rocks, the two dolostones were slightly more anisotropic than the limestones: the *K*, *As*, *ARS* and *dM* indices for the former were slightly higher, and the *AD* index lower, than for the limestones.

The anisotropy index values were very high for the slates, especially for the Sierra Negra material, because of their pronounced schistosity. This was the most anisotropic of all the varieties analysed.

The carbonate rocks and granites had similar anisotropy indices, with values well below the findings for the slates. The Colmenar limestone, together with the Alpedrete and Colmenar Viejo granites, were the most isotropic varieties.

5. Classes of anisotropy

While any of the indices described in section 2 may be used to determine anisotropy classes, the indices proposed by Guydader and Denis (1986) were chosen because, unlike the others, they distinguish between two-dimensional (*dm*) and three-dimensional (*dM*) anisotropy, which affects the hydraulic behaviour and decay of these materials. These indices provide additional information for the definition of anisotropy classes, inasmuch as they indicate the spatial direction in which the structural, textural or mineralogical orientation that determines anisotropy is concentrated.

The relative (*dm*%) and total (*dM*%) anisotropy values for each of the specimens made of the nine types of stone analysed are shown in the charts in figure 3. Cluster analysis identified five classes of anisotropy (I–V, respectively, the lowest to the highest) in the dolostones and granites from Cadalso de los Vidrios and Colmenar Viejo, and only three classes (I–III) in the Colmenar limestone, the granites from Alpedrete and Zarzalejo and the two varieties of slate.

Table 3 shows the mean relative (*dm*) and total (*dM*) anisotropy values for each of the classes identified, the percentage of specimens in each class and the *V_p* values (*V_{pmax}*, *V_{pmean}*, *V_{pmin}*). The authors propose the *dMm* index. This index, which is the sum of the *dM* and *dm* indices (*dMm*: *dM* + *dm*), allows us in a more direct way to arrange the anisotropic classes from the lowest values of anisotropy (class I) to the highest values of anisotropy in the rock (class V), as shown in table 3.

High total anisotropy index values (*dM*%), in conjunction with low values for relative anisotropy (*dm*%), were an indication that anisotropy in the stone was more intense in one of the three spatial directions. This may have been due to a preferential structural, textural or compositional orientation, slight in the case of the Zarzalejo and Cadalso granites, the Colmenar limestone and the Torrelaguna dolostone, and very pronounced in both types of slates. By contrast, when *dM*% and *dm*% values were similarly high, no single direction predominated in maximum anisotropy. In this case, the

entire variety was altered equally in all three directions. The Alpedrete and Colmenar Viejo granites and the Redueña dolostone are a case in point.

The anisotropy indices for the Alpedrete and Colmenar Viejo granites were lowest, and while the *dM* values tended to increase from the lower (class I) to the higher (classes III and V) classes, the *dm* values did not. Their anisotropy values were low and their mean *V_p* values were fairly high (Alpedrete, 4600 m s⁻¹ and Colmenar Viejo, 5200 m s⁻¹). The *dM* index was also much greater in the higher classes for the Zarzalejo and Cadalso de los Vidrios granites, with values of over 16. Their mean *V_p* values were 3300 and 3600 m s⁻¹, respectively.

In the carbonate rocks, and specifically in the Colmenar limestones, the *dM* values rose in the higher classes. This trend was also observed in the dolostones, which had the highest anisotropy indices (*dM* and *dm*). The Colmenar limestone was the variety with the highest mean *V_p*, nearly 5000 m s⁻¹, while the values for the stone from Torrelaguna and Redueña were 3800 and 2700 m s⁻¹, respectively.

The Bernardos and Sierra Negra slates showed the highest *dM* anisotropy values of all of the materials studied and the relative anisotropy value, *dm*, was also very high for the Sierra Negra slates. While these materials are highly anisotropic in general, because of its greater schistosity, the slate from Sierra Negra exhibited the highest anisotropy (*dM* 76.6% and *dm* 27.7%). Anisotropy, which rose progressively from class I to class III, was mirrored in a slightly downward trend in the *V_p*. This same trend was observed in the Bernardos slates, but with smaller anisotropy indices (*dM* 35.7% and *dm* 5.3%). The Bernardos material had a higher ultrasound propagation velocity (5700 m s⁻¹) than the other slates.

Mean ultrasound velocity is a parameter widely used to determine the quality of building stone. *V_p* declined with rising anisotropy only in the most anisotropic varieties (slates). In all other varieties, no significant trend was perceptible. This was because taking the values of the three directions measured in each specimen into consideration narrowed the differences defined by the plane of anisotropy, which was characterized by a decline in *V_{pmin}*. Since determining the mean *V_p* proved to be scantily significant, finding the mean *V_{pmin}* value was a more meaningful measure of material quality, as in the case of the granites from Zarzalejo and Cadalso as well as the dolostones. In the more isotropic rocks (Colmenar limestone, Alpedrete and Colmenar Viejo granites), no significant variations were observed in the *V_p* value. Consequently, anisotropy indices that take *V_{pmin}* into consideration and relate it to the other directions (*V_{pmax}* and *V_{pmean}*) furnish more information about rock behaviour. The distribution of the specimens in each anisotropy class was also indicative of stone quality. Specimens made from less anisotropic materials with a greater ultrasound propagation velocity were consistently more suitable, since they were less severely or at least more uniformly altered. Fort *et al* 2008 reported that increased anisotropy in rocks may be due to alteration, which entails a rise in porosity. It may also be caused by the heterogeneity of the stone with different diagenetic processes (cementation or dolomitization/de-dolomitization), as in the case of carbonate rocks. Quality proved to be highest in the Colmenar limestone,

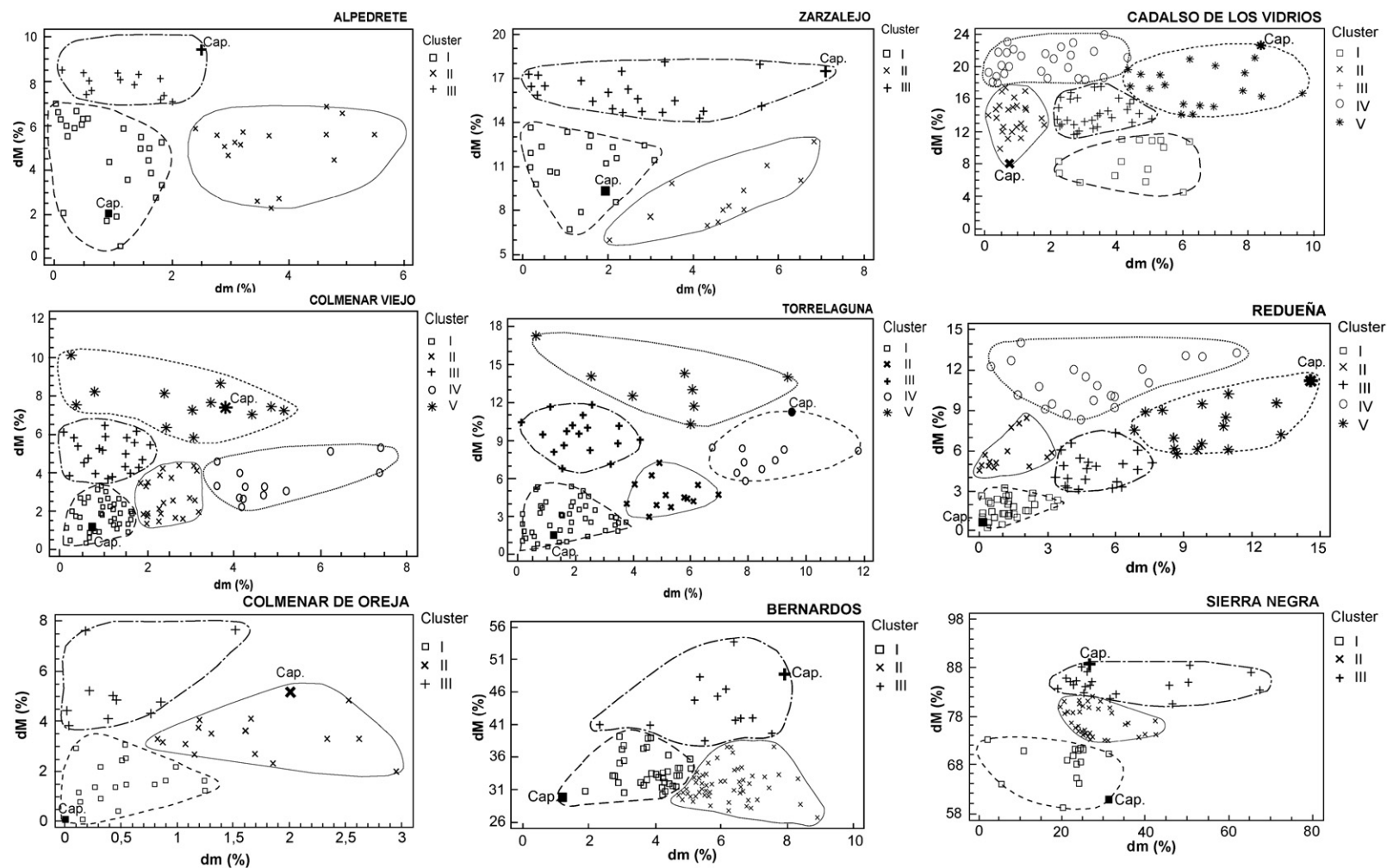


Figure 3. Anisotropic classes established in each stone type by clustering, and according to their anisotropy indices dM and dm .

Table 3. Anisotropy indices and ultrasound transmission velocity by cluster (velocities in m s^{-1}). The % column represents the percentage of samples analysed in each stone variety, and V_p is the mean value obtained from $V_{p_{\max}}$, $V_{p_{\text{mean}}}$ and $V_{p_{\min}}$.

		Cluster	dM%	dm%	dMm	%	$V_{p_{\max}}$	$V_{p_{\text{mean}}}$	$V_{p_{\min}}$	V_p
Granitic rocks	Alpedrete	I	4.69	0.84	5.52	40	4783 ± 112	4744 ± 113	4539 ± 96	4689 ± 100
		II	4.93	3.67	8.61	30	4739 ± 161	4568 ± 163	4425 ± 186	4577 ± 167
		III	7.58	1.49	9.07	30	4816 ± 94	4745 ± 114	4408 ± 95	4660 ± 91
	Zarzalejo	I	10.81	1.54	12.35	35	3374 ± 208	3322 ± 195	2985 ± 175	3227 ± 189
		II	9.72	6.56	16.28	23	3411 ± 209	3196 ± 215	2982 ± 188	3196 ± 197
		III	16.02	2.65	18.67	42	3656 ± 159	3561 ± 156	3030 ± 136	3416 ± 146
	Cadalso de los Vidrios	I	8.50	4.14	12.64	20	3631 ± 200	3550 ± 224	3006 ± 157	3623 ± 194
		II	14.07	0.79	14.19	14	4042 ± 228	3897 ± 233	3380 ± 167	3582 ± 205
		III	14.48	3.29	17.77	29	3698 ± 118	3593 ± 152	3195 ± 216	3580 ± 187
		IV	20.89	1.58	22.48	22	3914 ± 85	3783 ± 122	3077 ± 124	3567 ± 129
		V	17.84	6.24	22.67	15	3841 ± 139	3723 ± 136	3227 ± 375	3542 ± 155
	Colmenar Viejo	I	1.75	0.95	2.70	36	5360 ± 100	5219 ± 131	5005 ± 242	5153 ± 182
		II	2.66	2.45	5.11	20	5394 ± 113	5236 ± 139	5053 ± 186	5163 ± 223
		III	4.85	1.10	5.95	21	5276 ± 84	5081 ± 75	4970 ± 99	5272 ± 104
		IV	3.44	4.91	8.35	11	5416 ± 125	5262 ± 165	5013 ± 236	5204 ± 228
		V	7.82	3.22	11.03	12	5336 ± 100	5153 ± 139	4939 ± 238	5248 ± 188
Carbonate rocks	Torrelaguna dolostone	I	2.69	1.64	4.34	47	3858 ± 290	3795 ± 291	3724 ± 294	3792 ± 290
		II	4.71	5.26	9.97	14	3667 ± 196	3508 ± 179	3419 ± 195	3531 ± 189
		III	9.44	2.15	11.59	19	3970 ± 348	3887 ± 355	3557 ± 317	3805 ± 339
		IV	7.87	8.39	16.26	11	3954 ± 216	3627 ± 160	3494 ± 167	3692 ± 178
		V	13.39	5.09	18.48	9	4102 ± 370	3907 ± 317	3470 ± 294	3826 ± 320
	Redueña dolostone	I	1.94	1.57	3.51	33	2860 ± 332	2815 ± 326	2783 ± 329	2820 ± 329
		II	5.65	2.09	7.74	19	2890 ± 315	2840 ± 307	2715 ± 311	2815 ± 310
		III	5.52	7.07	12.59	20	2854 ± 278	2661 ± 271	2606 ± 272	2707 ± 272
		IV	9.43	3.65	13.33	19	2732 ± 315	2618 ± 316	2385 ± 287	2578 ± 304
		V	9.52	10.71	20.23	9	2879 ± 259	2564 ± 205	2448 ± 174	2630 ± 208
	Colmenar limestone	I	1.48	0.51	1.99	42	5954 ± 121	5881 ± 136	5874 ± 136	5939 ± 121
		II	3.42	1.68	5.11	36	5967 ± 99	5812 ± 117	5758 ± 95	5949 ± 97
		III	5.21	0.49	5.69	22	6008 ± 139	5708 ± 116	5702 ± 105	5918 ± 131
Slates	Bernardos	I	33.06	3.81	36.87	32	6567 ± 105	6315 ± 92	4271 ± 283	5717 ± 120
		II	31.62	6.21	37.83	55	6649 ± 79	6248 ± 73	4385 ± 283	5761 ± 89
		III	42.39	5.90	48.29	13	6660 ± 110	6278 ± 82	3727 ± 252	5555 ± 105
	Sierra Negra	I	67.88	21.22	89.09	22	5121 ± 641	4114 ± 305	1487 ± 264	3574 ± 372
		II	77.01	27.96	104.96	50	5363 ± 453	4053 ± 420	1079 ± 151	3498 ± 302
		III	84.89	34.17	119.06	28	5494 ± 182	3930 ± 596	712 ± 114	3379 ± 252

as most of its specimens were in classes I and II, with lower dM, dm and dMm index values than the Redueña and Torrelaguna dolostones. Redueña exhibited the least desirable behaviour.

The Alpedrete and Colmenar Viejo granites had a larger number of specimens in the less anisotropic classes, while the Zarzalejo and Cadalso de los Vidrios materials had more specimens in the higher classes. In both slates more than 50% of the specimens analysed were in class II.

This explains how the anisotropy class affects material alteration. Alteration would be faster, more intense and more uneven in Redueña than in Torrelaguna dolostone, where the process would be more uniform; the Alpedrete granite, like the Colmenar limestone, would behave more uniformly than the Zarzalejo and Cadalso granites, primarily because the anisotropy classes of the latter two are characterized by higher indices than the Alpedrete and Colmenar varieties.

6. Stone hydraulic behaviour and anisotropy

The heterogeneity in composition, texture and structure of construction materials underlies the differences in their rate of

decay. Positioning materials along their planes of anisotropy may favour these processes by facilitating water ingress. Water absorption in natural building stone may therefore be influenced by its degree of anisotropy. Water tends to be absorbed differently depending on the preferential directions of anisotropy, which are characterized primarily by the position and distribution of the pores in the rock along preferential planes. In principle, water absorption at atmospheric pressure should not be affected by the degree of anisotropy of the materials, since in that test water penetrates inwards into the rock in all directions, because the specimen is completely immersed in water. Nonetheless, the planes where more pores are concentrated may tend to fill more quickly than in other directions, in which water is taken up more slowly. This may explain the change in slope of the absorption and desorption curves (amount of water absorbed/evaporated over time) in some of these materials, as more porous planes facilitate the movement of water.

Table 4. Density, open porosity and water absorption at atmospheric pressure of each of the clusters of the anisotropy classes.

	Cluster	Density (kg m ⁻³)	Porosity (%)	Water absorption (%)
Alpedrete granite	I	2670 ± 20	0.80 ± 0.11	0.29 ± 0.05
	II	2668 ± 12	0.88 ± 0.14	0.31 ± 0.03
	III	2667 ± 18	0.77 ± 0.08	0.28 ± 0.04
Zarzalejo granite	I	2656 ± 19	1.68 ± 0.08	0.58 ± 0.03
	II	2660 ± 15	1.68 ± 0.09	0.58 ± 0.03
	III	2669 ± 25	1.58 ± 0.12	0.54 ± 0.04
Cadalso de los Vidrios granite	I	2599 ± 19	1.34 ± 0.24	0.49 ± 0.08
	II	—	—	—
	III	2602 ± 18	1.26 ± 0.23	0.47 ± 0.08
	IV	2595 ± 70	1.13 ± 0.19	0.41 ± 0.07
	V	2598 ± 13	1.28 ± 0.27	0.48 ± 0.09
Colmenar Viejo granite	I	2613 ± 23	0.72 ± 0.12	0.36 ± 0.02
	II	2604 ± 15	0.74 ± 0.19	0.41 ± 0.29
	III	2625 ± 30	0.73 ± 0.13	0.32 ± 0.06
	IV	2600 ± 11	0.70 ± 0.16	0.28 ± 0.06
	V	2606 ± 28	0.81 ± 0.19	0.33 ± 0.07
Torrelaguna dolostone	I	2531 ± 49	9.89 ± 1.70	3.31 ± 0.67
	II	2537 ± 30	9.57 ± 1.08	3.15 ± 0.40
	III	2517 ± 23	10.46 ± 1.20	3.49 ± 0.51
	IV	—	—	—
	V	2510 ± 35	10.76 ± 1.00	3.62 ± 0.44
Redueña dolostone	I	2365 ± 88	15.8 ± 3.20	5.44 ± 1.31
	II	2369 ± 70	15.0 ± 1.40	5.11 ± 0.42
	III	2397 ± 47	14.5 ± 2.00	4.81 ± 0.77
	IV	2293 ± 11	18.4 ± 4.30	6.67 ± 1.72
	V	2350 ± 76	16.2 ± 2.70	5.38 ± 1.15
Colmenar limestone	I	2572 ± 30	4.07 ± 1.45	0.92 ± 0.52
	II	2586 ± 31	3.76 ± 0.98	0.78 ± 0.17
	III	2590 ± 27	3.29 ± 1.20	0.62 ± 0.17
Bernardos slate	I	2754 ± 50	0.42 ± 0.05	0.16 ± 0.01
	II	2748 ± 40	0.39 ± 0.03	0.14 ± 0.01
	III	2751 ± 11	0.51 ± 0.06	0.19 ± 0.01
Sierra Negra slate	I	2598 ± 38	7.12 ± 0.43	2.23 ± 0.09
	II	2618 ± 30	8.77 ± 0.99	2.81 ± 0.35
	III	2575 ± 49	8.49 ± 0.93	2.66 ± 0.30

Table 5. Capillarity coefficient (g m⁻² s^{-0.5}) of the stone varieties according to the anisotropic class, anisotropic indices and orientation of the material during the capillarity test.

	Anisotropy class	dM (%)	dm (%)	Orientation	Capillarity coefficient
Alpedrete granite	I	2.10	0.91	⊥	1.523
					1.639
				⊥	3.128
	III	9.38	2.55	⊥	3.983
					4.238
				⊥	4.580
Zarzalejo granite	I	9.31	1.90	⊥	4.648
					4.796
				⊥	3.502
Cadalso granite	II	7.90	0.77	⊥	4.706
					3.635
				⊥	3.695
	V	22.60	8.40	⊥	0.969
					1.437
				⊥	1.054
Colmenar Viejo granite	I	1.14	0.70	⊥	1.058
					8.029
				⊥	27.831
	V	7.38	3.84	⊥	45.053
					52.025
				⊥	86.228
Torrelaguna dolostone	I	1.92	1.47	⊥	86.187
					77.821
				⊥	88.093
	IV	11.30	9.50	⊥	1.429
					1.544
				⊥	1.488
Redueña dolostone	I	0.66	0.14	⊥	3.589
					0.171
				⊥	0.227
	V	11.34	14.46	⊥	0.191
					0.280
				⊥	5.987
Colmenar limestone	I	0.08	0.01	⊥	16.760
					5.331
				⊥	22.839
	II	5.21	2.01	⊥	
				⊥	
Bernardos slate	I	29.59	1.23	⊥	
				⊥	
	III	48.29	8.06	⊥	
				⊥	
Sierra Negra slate	I	60.68	31.30	⊥	
				⊥	
	III	88.40	26.17	⊥	
				⊥	

6.1. Water absorption and porosity accessible to water

These two parameters are directly related: the more porous a rock, the more water it can absorb. Similarly, materials with a high level of porosity accessible to water show the lowest ultrasound propagation velocity. In this study, the dolostones and Sierra Negra slates absorbed more water than any of the other materials.

Both types of dolostones (Redueña and Torrelaguna) exhibited a high degree of porosity accessible to water, very likely as a result of their diagenetic dolomitization. The specimens in the highest anisotropy classes had the highest porosity, and consequently the greatest sorptivity.

These high porosity values were also observed in the slates, more visibly in the Sierra Negra than in the Bernardos material, due to the greater schistosity in the former.

In the Colmenar limestone, whose average porosity was 3.8% (table 1), the value declined as the anisotropy index rose (dM%) (tables 3 and 4). All the granitic rocks followed a similar pattern: as their anisotropy rose (dM%), their porosity dipped, except in the Colmenar Viejo granite, whose value rose from 0.72% to 0.81% (table 4) between classes I and V.

In short, in the less anisotropic rocks, no significant trends were observed in the average porosity and water absorption values with rising anisotropy, whereas in the more anisotropic rocks (dolostones and slates), porosity and water absorption increased with anisotropy.

6.2. Capillary water uptake

Capillary water uptake is conditioned by the pore distribution in the stone and tends to rise in systems with a predominance of capillary pores, which favour water ingress when absorption takes place along the planes of anisotropy.

Table 5 shows the water absorption coefficients for the classes with the highest and lowest anisotropy in each type of rock. As a rule, the most anisotropic rocks had the highest capillary coefficient. Hence, the Zarzalejo and Cadalso de los Vidrios stones, the most porous granites with the lowest propagation velocity (table 1), exhibited the highest anisotropy indices (table 3) and absorption coefficients (table 5). The same pattern was observed in the carbonate rocks: the Redueña stone had very high absorption coefficient values, most likely

because it had the highest porosity accessible to water and a significant percentage of capillary pores (Fort *et al* 2008). This same relationship was observed in the slates, where the coefficient for the Sierra Negra material was much higher than the value for the Bernardos stone.

The absorption capillary coefficient was generally observed to be higher in the more anisotropic classes of each type of stone. The differences between the values of this coefficient for the most and least anisotropic classes were slight, except in the case of the Alpedrete granite, where the coefficient rose from $1.52 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ in class I to 3.13 in class III, and the Torrelaguna dolostone, which varied from 8.03 to $45.05 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ (table 5). Moreover, when capillary water was taken up in a direction perpendicular to the planes of weakness or anisotropy, the absorption coefficient was observed to be lower than when it was measured in a direction parallel to that plane. In other words, the absorption coefficients were higher when measured parallel to the direction of the lowest anisotropy in the stone (e.g., the Sierra Negra slate). These increases were more significant in the varieties in which anisotropy was generated by planar phenomena, such as cracking or open schistosity (Sierra Negra slate), or stromatolite growth (Torrelaguna stone). The $\text{dm}\%$ index was usually high in these varieties, such as in the Redueña stone.

In a nutshell, the capillary absorption coefficient tends to rise with rising porosity and anisotropy (tables 3–5), especially when water ingress is influenced by the presence of planar structures that facilitate suction and circulation inside the rock.

7. Conclusions

The dM and dm indices are regarded to be best suited to determining the degree of anisotropy in rocks.

As expected, the Bernardos and Sierra Negra slates were the varieties of natural stone with the highest degree of anisotropy. On the grounds of anisotropy, ultrasound propagation velocity and lower open porosity, the Bernardos slate was of higher quality than the Sierra Negra material. Furthermore, according to the values obtained, this variety was very heterogeneous, with higher standard deviations. The Bernardos slate water absorption coefficient was also very low, although it rose slightly when suction was along the plane of cleavage. These coefficients were much lower than those in the Sierra Negra slates, which were not suitable for use in construction requiring high quality materials.

Colmenar limestone was the highest quality carbonate rock studied, with fairly low anisotropy and high V_p values. As the most isotropic stone, it can be laid with no regard to orientation. By contrast, the stone from Torrelaguna and Redueña had high anisotropy indices in classes IV and V. The materials in these classes are not recommended for use, as their anisotropy would have a very direct and adverse effect on decay. Of the two, resistance to decay would be higher in the less porous Torrelaguna dolostone than in the Redueña material. When limestone is the material chosen to restore the architectural heritage, use of the Torrelaguna variety is recommended whenever possible, provided it is

compatible with the original stone. The stones should be laid with the plane of greatest anisotropy or lowest V_p parallel to the direction in which the capillary water is absorbed (which is usually vertical and ascending), so as to minimize decay induced by water ingress.

Of the granites, in turn, the Alpedrete variety had the lowest anisotropy. This and the Colmenar Viejo stones were the highest quality granites, with high ultrasound propagation velocities and low effective porosity. Moreover, no significant variations were observed in the anisotropy from one class to another, with greatest uniformity found for the Alpedrete stone. In the other two varieties (Zarzalejo and Cadalso de los Vidrios), anisotropy was higher and the V_p lower, especially in the former. In this variety, only class I materials should be used. The Cadalso granite was of higher quality than the Zarzalejo stone.

Mean ultrasound propagation velocity is not enough to determine the quality of the natural stone; the minimum propagation velocity ($V_{p_{\min}}$) is more representative, as it has a more direct effect on stone decay.

Construction material anisotropy determines resistance to the agents inducing decay. The way these materials are positioned may contribute to decay by facilitating water ingress. Capillary water uptake is also influenced by the direction in which the stone is laid: absorption is greater in more anisotropic, more porous varieties and in the direction parallel to the plane of anisotropy, where water is absorbed more quickly and with a higher coefficient (direction of the lowest ultrasound speed).

This explains the differential alteration of materials from the same quarry and forming part of the same structure, as these members and ashlar would often have been laid according to no apparent structural criteria or regard for their anisotropy. The least suitable arrangement would facilitate water ingress, in larger volumes in certain directions, expediting decay in those directions. Therefore, higher quality can be attained by choosing stone varieties with low anisotropy indices (classes I and II) and refraining from using materials in higher classes to build the same wall, since this may induce differential decay. Further to these criteria, the Alpedrete and Colmenar Viejo granites afford the highest quality because of their uniform anisotropy. Of the carbonate rocks, the Colmenar limestone offers the highest quality because of its petrophysical properties, as well as its very low, uniform anisotropic indices. The Torrelaguna dolostones would ensure better performance than the other variety as they absorb less water, and their anisotropic indices are more uniform (48% of the test pieces are in class I). Bernardos slates would behave more satisfactorily than the Sierra Negra variety.

The determination of anisotropy in a material is a simple, repetitive process that entails very low costs after the initial investment in equipment. It can provide medium- to long-term savings by delaying decay and lengthening the durability of materials and, therefore, buildings or infrastructures. This is a preventive conservation method, in line with today's trends, as opposed to interventional or corrective conservation, which is always costlier and more invasive.

Acknowledgments

This project forms part of the GEOMATERIALES research programme (S2009/MAT-1629), funded by the Autonomous Community of Madrid, and the Ministry of Education and Science's CONSOLIDER-INGENIO 2010 programme (CSD2007-0058). It is one of the research projects implemented by the UCM (Complutense University of Madrid) group 'Alteration and Conservation of Stone Materials in the Built Heritage' (no 921349). The authors wish to thank PIZARRAS J. BERNARDOS S.L. for its support for this project, and the Spanish Geological Survey (IGME), and particularly Bárbara Fernández-Revuelta, for their assistance in preparing the samples.

References

- Alonso F, Rubio F J, Martín Parra L M and Rodríguez Fernández L R 2005 Nuevos datos sobre la estratigrafía del Ordovícico y estructura varisca en el Macizo de Santa María la Real de Nieva (New data about the stratigraphical record of the Ordovician and Variscan structure in the Santa Maria la Real de Nieva Massif) *Geogaceta* **37** 39–42
- Benavente D, Martínez-Martínez J, Cueto N and García-del-Cura M A 2007 Salt weathering in dual-porosity building dolostones *Eng. Geol.* **94** 215–26
- Benson P M, Meredith P G, Platzman E S and White R E 2005 Pore fabric shape anisotropy in porous sandstones and its relation to elastic wave velocity and permeability anisotropy under hydrostatic pressure *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **42** 890–9
- Birch F 1961 The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2 *J. Geophys. Res.* **66** 2199–224
- Buj O and Gisbert J 2007 Petrophysical characterization of three commercial varieties of miocene sandstones from the Ebro valley *Materiales de Construcción* **57** 63–74
- Cueto N, Benavente D, Martínez-Martínez J and García del Cura M A 2009 Rock fabric, pore geometry and mineralogy effects on water transport in fractured dolostones *Eng. Geol.* **107** 1–15
- Dapena E, Ordóñez S and García del Cura M A 1989 Estudio de las rocas calizas utilizadas durante los siglos XVIII y XIX en la construcción de los palacios de Madrid *Ingeniería Civil* **71** 67–77
- Del Río L M, Lopez F, Esteban F J, Tejado J J, Mota M I, Gonzalez I, San Emeterio J L and Ramos A 2006 Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain) *Ultrasonics* **44** e1057–61
- Dreesen R and Duser M 2004 Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment *Mater. Charact.* **53** 273–87
- Esbert R M 2007 Alteration of granite stone used in building construction *Materiales de Construcción* **57** 77–89
- Fernandez-Revuelta B, Galán L, Fort R, Varas M J and Álvarez de Buergo M 2008 Influencia de la anisotropía en la caracterización hídrica de la Pizarra de Bernardos *Geotemas* **10** 1539–42
- Fort R, Álvarez de Buergo M, Perez-Monserrat E M and Varas M J 2010a Monzogranitic batholiths as a supplying source for the heritage construction in the northwest of Madrid *Eng. Geol.* **115** 149–57
- Fort R, Álvarez de Buergo M, Varas-Muriel M J and Gomez-Heras M 2010b Anisotropy indices and the effects on the hydric behaviour of natural stone *Geophys. Res. Abstr.* **12** 6830-1
- Fort R, Bernabeu A, García del Cura M A, López de Azcona M C, Ordóñez S and Mingarro F 2002 Novelda stone: widely used within the Spanish architectural heritage *Materiales de Construcción* **52** 19–32
- Fort R, Fernandez-Revuelta B, Varas M J, Alvarez de Buergo M and Taborda M 2008 Effect of anisotropy on Madrid-region Cretaceous dolostone durability in salt crystallization processes *Materiales de Construcción* **58** 161–77
- Fort R, Mingarro F and Lopez de Azcona M C 1996 Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid *Geogaceta* **20** 1236–39
- Fort R, Varas M J, Pérez-Monserrat E M, Luque J, Alvarez de Buergo M and Vazquez-Calvo C 2007 Los ladrillos del recinto amurallado de Talamanca de Jarama, Madrid: criterios para su diferenciación (Bricks of the walled complex of Talamanca de Jarama, Madrid: criteria for their differentiation) *Boletín Sociedad Española Cerámica y Vidrio* **46** 145–52
- García del Cura M A, Benavente D, Bernabéu A and Martínez-Martínez J 2008 The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers *Materiales de Construcción* **58** 65–79
- Gomez-Heras M and Fort R 2004 Location of quarries of non traditional stony materials in the architecture of Madrid: the Crypt of Catedral de Santa María la Real de la Almudena *Materiales de Construcción* **54** 33–48
- Gonzalez-Casado J M, Caballero J M, Casquet C, Galindo C and Tornos F 1996 Palaeostress and geotectonic interpretation of the Alpine Cycle onset in the Sierra del Guadarrama (eastern Iberian Central System), based on evidence from episyenites *Tectonophysics* **262** 213–29
- Guéguen Y and Schubnel A 2003 Elastic wave velocities and permeability of cracked rocks *Tectonophysics* **370** 163–76
- Guydader J and Denis A 1986 Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers *Bull. Eng. Geol.* **33** 49–55
- Hammecker C, Mertz J D, Fischer C and Jeannette D 1993 A geometrical model for numerical simulation of capillary imbibition in sedimentary rocks *Transp. Porous Media* **12** 125–41
- Khan S S and Ahmad A 2004 Cluster center initialization algorithm for k-means clustering *Pattern Recognit. Lett.* **25** 1293–302
- King M S 2002 Elastic wave propagation in and permeability for rocks with multiple parallel fractures *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **39** 1033–43
- López-Arce P, Varas-Muriel M J, Fernández-Revuelta B, Álvarez de Buergo M, Fort R and Pérez-Soba C 2010 Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: surface roughness quantification *Catena* **83** 170–85
- Myrin M and Malaga K 2006 A case study on the evaluation of consolidation treatments of Gotland sandstone by use of ultrasound pulse velocity measurements *Heritage, Weathering and Conservation* vol 2, ed R Fort, M Alvarez de Buergo, M Gomez-Heras and C Vazquez-Calvo (London: Taylor and Francis) pp 749–55
- Přikryl R, Lokajíček T, Prosa Z and Klímab K 2007 Fabric symmetry of low anisotropic rocks inferred from ultrasonic sounding: implications for the geomechanical models *Tectonophysics* **431** 83–96
- Ruedrich J and Siegesmund S 2007 Salt and ice crystallisation in porous sandstones *Environ. Geol.* **52** 225–49
- Schön J H 1996 Physical properties of rocks *Fundamentals and Principles of Petrophysics* Tarrytown (New York: Pergamon)
- Sebastián E, de la Torre M J, Cazalla O, Cultrone G and Rodriguez-Navarro C 1999 Evaluation of treatments on biocalcarenes with ultrasound *6th International Conference on 'Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environment Heritage'* pp 357–70
- Sheremeti-Kabashi F and Snethlage R 2000 Determination of structural anisotropy of Carrara marble with ultrasonic measurements *9th Int. Congress on Deterioration and*

- Conservation of Stone* vol 1 ed V Fassina (Amsterdam: Elsevier) pp 247–53
- Sousa L M O, Suarez del Río L M, Calleja L, Ruiz de Argandoña V G and Rodríguez Rey A 2005 Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites *Eng. Geol.* **77** 153–68
- Takemura T, Golshani A, Oda M and Suzuki K 2003 Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **40** 443–54
- Varas M J, Álvarez de Buergo M, Pérez-Monserrat E and Fort R 2008 Decay of the restoration render mortar of the church of San Manuel and San Benito, Madrid, Spain: results from optical and electron microscopy *Mater. Charact.* **59** 1531–40
- Vasconcelos G, Lourenço P B, Alves C A S and Pamplona J 2008 Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites *Ultrasonics* **48** 453–66
- Villaseca C, Barbero L and Rogers G 1998 Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints *Lithos* **43** 55–79
- Weiss T, Siegesmund S and Rosolofosaon P 2000 The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint *9th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone* vol 1, ed V Fassina (Amsterdam: Elsevier) pp 215–23
- Yavuz H, Altindag R, Sarac S, Ugur I and Sengun N 2006 Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze–thaw and thermal shock weathering *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **43** 767–75
- Zezza U 1990 Physical-mechanical properties of quarry and building stones *Advanced Workshop: Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stone* ed F Veniale and U Zezza (Pavia, Italy: Pavia University)
- Zhang X and Sanderson D J 1995 Anisotropic features of geometry and permeability in fractured rock masses *Eng. Geol.* **40** 65–75

6.3 Freeze-thaw fracturing in building granites.

Cold Regions Science and Technology, 113: 40-51. doi:10.1016/j.coldregions.2015.01.008

Freire-Lista, D.M., Fort, R. y Varas Muriel, M.J.

Cuatro granitos utilizados en las construcciones de la Comunidad de Madrid fueron sometidos a 280 ciclos del ensayo de envejecimiento artificial acelerado contemplado en la norma europea UNE-EN 12371 (2001/2011) para determinar su respuesta a los efectos del hielo/deshielo.

El deterioro del granito inducido por la acción del hielo/deshielo se estudió mediante microscopía óptica de polarización y de fluorescencia, para cuantificar el tipo de microfisuras (inter, intra o transcristalina) y la densidad lineal de fisuras (establecida en número de fisuras por milímetro), así como mediante difracción de rayos X para identificar las fases minerales asociadas. Además, se determina la velocidad de propagación ultrasónica (de la onda P y onda S), el porcentaje de absorción de agua en condiciones de vacío y la porosidad por intrusión de mercurio. Igualmente, se calcula el módulo de Young antes y después de los ciclos de hielo/deshielo.

El principal deterioro provocado por la acción del hielo fue la generación de microfisuras, resultado de la segregación del hielo, entre otros mecanismos. En los cuatro granitos ensayados, las velocidades de propagación de ultrasonidos y parámetros de resistencia disminuyeron con el desarrollo de la microfisuración inducida por hielo/deshielo. En los primeros ciclos se desarrollaron más microfisuras intercristalinas, mientras que al final se generó un mayor número de microfisuras intracristalinas. Al término de los ciclos, el granito de Zarzalejo experimentó el desarrollo de un mayor número de microfisuras, con el consiguiente aumento de su densidad lineal de fisuras. En el granito de Colmenar Viejo los ciclos de hielo/deshielo provocaron la menor cantidad de microfisuras, denotando una mayor resistencia a los procesos de congelación-descongelación. El menor incremento en el número de microfisuras se produce en el granito de Cadalso de los Vidrios.

Los resultados microscópicos y de microporosidad obtenidos revelan que el ensayo de hielo-deshielo realizado induce el origen de una microfisuración en los granitos, que si bien apenas afecta a su estabilidad mecánica (módulo de Young), sí que provoca ciertos daños, pudiendo favorecer el desplacado superficial del mismo. Estos resultados se pueden aplicar a otros granitos con características similares y que presenten microfisuración, generando los mismos mecanismos de deterioro por acción de las heladas.



Freeze–thaw fracturing in building granites

D.M. Freire-Lista ^{a,b,*}, R. Fort ^{a,b}, M.J. Varas-Muriel ^{a,c}

^a Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC, Complutense University of Madrid UCM, Madrid, Spain

^b CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid, Spain

^c School of Geology, Complutense University of Madrid UCM, 28040 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 May 2014

Received in revised form 20 January 2015

Accepted 22 January 2015

Available online 30 January 2015

Keywords:

Granite

Durability

Weathering

Freeze–thaw test

Microcracks

ABSTRACT

Four types of granite widely exported and used in construction around the world were subjected to 280 accelerated freeze–thaw test cycles, conducted as stipulated in European standard UNE-EN, 12371, 2001 to ascertain their petrophysical response.

The techniques used to characterise the granite before and after freeze–thaw-induced microcracking included vacuum water absorption, ultrasonic P-wave pulse velocity and ultrasonic S-wave pulse velocity, mercury intrusion porosimetry and polarised optical and fluorescence microscopy to quantify the type of microcracks developing (inter-, intra- or transcrystalline) and identify the associated mineral phases: quartz, feldspar and biotite. The linear crack density (number of cracks per millimetre) was calculated based on the microscopic data collected. Young's modulus was likewise found before and after the freeze–thaw cycles.

The chief ice crystallisation mechanism was involved in microcracking and hence deterioration was ice segregation. In all four granites, ultrasonic propagation velocities and strength parameters declined with the development of freeze–thaw-induced microcracking. More intercrystalline microcracks were developed in the early cycles, while larger numbers of intracrystalline microcracks were found at the end of the test.

The results of this study can be applied to other granites with similar characteristics and whose microcracks are generated with same mechanisms of frost damage.

Upon conclusion of the cycles, Zarzalejo granite exhibited the largest number of microcracks, with a linear crack density of 3.9, as well as the highest rise in microcracking. Colmenar Viejo ended the freeze–thaw test with the fewest number of microcracks and a post-test linear crack density of 2.3, denoting greater freeze–thaw resistance. The smallest increase in the number of microcracks was found for Cadalso de los Vidrios granite.

The microscopic and microporosity findings reported in this paper revealed the existence of freeze–thaw test-induced microcracking which, while barely affecting mechanical stability (Young's modulus), did cause damage.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Granite has been traditionally used as a building stone, in some countries because of quarry proximity to cities and in many others as a high quality import (Fort et al., 2013). Spain is the world's seventh largest producer of natural stone and the fourth largest exporter. Granite ships primarily to other European countries and North America for use in cities such as Vancouver, Paris, Cork, and Munich where temperatures dip below freezing over 30 times yearly, inducing freeze–thaw (FT) events (Ruedrich and Siegesmund, 2007; Ruedrich et al., 2011).

Thousands of tonnes of these granites are exported annually for use as construction materials in prominent buildings. Some examples are the Cork International Airport terminal in Ireland, Place Romagné in

France, and retail parks at Dortmund, Germany and Guangzhou, China. Hence, there is the need to meet high quality standards to ensure the optimal performance in all manner of situations (Siegesmund and Török, 2011).

The aim of the present study is to determine the quality of four widely used building granites to FT weathering, determined on the grounds of (P- and S-wave) ultrasonic pulse velocity, Young's modulus, linear crack density and porosity in several FT weathering stages. Damage was established by comparing the findings obtained with destructive and non-destructive techniques.

The objective of FT testing is to simulate natural weathering caused by ice at a faster pace in the laboratory (Halsey et al., 1998). This may induce rapid change in the physical and mechanical properties of these materials in humid open systems with widely fluctuating temperatures (Ehlen, 2002; Gupta and Rao, 2001; Hall et al., 2012; Hudec, 1998; Iñigo et al., 2000; Jamshidi et al., 2013; Rivas-Brea et al., 2008; Sanjurjo and Alves, 2006).

FT has a direct impact on landforms and building stone durability (Kieslinger, 1931). It limits durability not only in very cold regions, but

* Corresponding author at: Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), Calle José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid, Spain. Tel.: +34 913944903; fax: +34 923219609.

E-mail addresses: d.freire@igeo.ucm-csic.es (D.M. Freire-Lista), rafael.fort@csic.es (R. Fort), mjvaras@geo.ucm.es (M.J. Varas-Muriel).

also where freezing occurs during few days in temperate climates where temperatures occasionally drop to below freezing, particularly during the night (Takarli et al., 2008). Where these cycles are frequent (Halsey et al., 1998), they generate fatigue in granite and cracks through which water can ingress.

When ice crystallisation pressure equals the tensile strength of the rock, further microcracks develop and the existing cracks deepen and widen, damaging the rock. Ice crystallisation and growth mechanisms in geomaterials have been the object of research for several decades (Coussy and Fen-Chong, 2005; Hor and Morihiro, 1998; Scherer, 1999). Several mechanisms exist to explain ice crystallisation-induced stress in wall cracks (Chen et al., 2004; Ingham, 2005; Ruedrich and Siegesmund, 2007).

The volumetric expansion of water during freezing: when water congeals its volume increases about 9%, generating pressure on the walls of the cracks, which favours widening (Ozcelik et al., 2012). For cracking to be due only to the expansion associated with the water to ice phase change, the rock would have to be highly saturated. FT-induced natural damage occurs without such saturation. (Chen et al., 2004; Ruedrich and Siegesmund, 2007; Takarli et al., 2008).

Another mechanism is hydraulic pressure (Hor and Morihiro, 1998). The increase in volume attendant upon ice crystallisation confines the (liquid) water, which then places pressure on the walls of the cracks. This premise is based on the observation that ice crystallises as it moves deeper into the rock. Due to its increased volume, unfrozen water may ingress into the pore space. If insufficient expansion space is available near the ice front, stress is generated in the matrix. Other stress development models are based on osmotic pressure (Powers and Helmuth, 1953) and anomalous variations in ice density when it crystallises quickly.

Ice segregation (Akagawa and Fukuda, 1991; Arakawa, 1965; Hallet et al., 1991; Matsuoka and Murton, 2008; Tabor, 1929, 1930; Walder and Hallet, 1985) takes place in freezing or frozen microporous media. The unfrozen water held in microcracks and adsorbed onto the surfaces of mineral particles is forced by temperature gradient-induced suction through a porous medium such as micro-cracked granite toward freezing sites where ice lenses, ribbons, needles, layers or strands grow (Murton et al., 2006). In other words, water that starts off widely dispersed in the porous rock segregates into discrete pieces of ice. Since water but not ice can flow through pores of this size, ice segregation is a major cause of cracking in moist, porous rocks (Matsuoka, 2001).

Frost damage may entail a combination of several mechanisms, although one or another generally predominates, depending upon conditions (Ingham, 2005). Water and temperature are the main weathering agents in FT ageing. As a rule, crystallisation begins in large surface cracks, for in smaller cracks ice crystallisation calls for colder temperatures. FT-induced decay in natural stone therefore depends largely on the existence of open cracks, the natural channels for water penetration into rock, and their post freezing development (Martínez-Martínez et al., 2013).

Ice crystallisation cracking in granite is not fully understood, since it depends on a number of factors (Hudec, 1998): the temperature range, the frequency of FT, the stress applied, water composition and moisture content, as well as internal factors such as rock mineralogical composition, texture, rock strength, characteristics of the existing pore microstructure and thermal conductivity of the constituents.

Preceded by elastic deformation in granite (Lajtai, 1998), in addition to existing crack closure and internal crack sliding, changes in the microcrack network affect the physical and mechanical properties (Prikrýl, 2001) of the rock and are responsible for the decay and anisotropy found in many granites (Fujii et al., 2007; Fort et al., 2011). Microcrack characteristics and the physical-mechanical properties of rocks are, then, essential considerations when assessing material durability (Matias and Alves, 2001; Sousa et al., 2005).

Mechanical strength in granites is related to a number of petrographic parameters, including: grain size (Akeson et al., 2001; Tuğrul and Zarif, 1999; Yilmaz Günes et al., 2011), microstructural characteristics (Alm et al., 1985; Carvalho et al., 1997; Feng and Yu, 2000; Lindqvist et al., 2007; Nasser and Mohanty, 2008; Vasconcelos et al., 2008), mineral composition (Miskovsky et al., 2004), grain boundaries (Raisanen, 2004) and mineral shape and spatial arrangement (Akeson et al., 2003).

When destructive tests (such as static laboratory tests in heritage buildings) cannot be performed to determine the mechanical characteristics of the rock, the dynamic modulus (King, 1983; Vanheerden, 1987; Lam dos Santos et al., 2013) must be found with non-destructive techniques such as ultrasonic testing (Eissa and Kazi, 1988; Brotóns Torres et al., 2014). As mechanical moduli are required to calculate the strain on new buildings generated by the live loads applied, pre- and post-FT Young's modulus values were calculated in this study.

Like other agents of rock decay such as wet/dry cycles, thermal shock and salt crystallisation, FT is regarded as a physical weathering agent (Jamshidi et al., 2013; Shalkowshi et al., 2009), weathering granite at a rate of several millimetres per thousand years (Chen, 2000). An understanding of the long-term durability of construction granite exposed to FT cycles is therefore in order. While decay function models have been developed to predict FT-induced deterioration of the mechanical properties of building stone (Bayram, 2012; Jamshidi et al., 2013; Mutlutürk et al., 2004), the respective equations are only valid for specific rocks.

Although FT testing has been standardised (UNE-EN, 12371, 2011; TSE 699, 1987, ASTM D5312/D5312M-12, 2013; DIN 52104, 1982), the number of FT cycles applied and the physical property used to quantify FT action differ among standards. The effect of FT has therefore been studied from different perspectives for different types of rocks.

A sizeable number of studies have been conducted on freezing in building stones in recent decades. The number and duration of FT cycles and the temperature sequence and range applied in those studies varied widely. The concomitant inconsistencies in the findings (Cárdenes et al., 2014) must be borne in mind when comparing the results.

Ingham (2005) ran 50 cycles, for instance, compared to the 1400 run by authors such as Ruedrich et al. (2011). Iñigo et al. (2000), García-del-Cura et al. (2008), Karaca et al. (2010), Jamshidi et al. (2013) applied 24-hour cycles, while in the Del Río et al. (2005) study cycle duration was 4 h and in the Tan et al. (2011) survey, 8. The temperature ranges also varied: Ozcelik et al. (2012) established a low of -40°C and a high of 180°C , while in Wang et al. (2007) the interval ran from -7 to 14°C .

Some authors measured FT-induced decay on the grounds of sample weight loss (Erguler and Shakoor, 2009; Iñigo et al., 2000) or variations in ultrasonic pulse velocity (Iñigo et al., 2013; Liu et al., 2012; Matsuoka, 1990; Ruedrich, et al., 2011; Takarli et al., 2008). Others developed equations from which to infer microcrack distribution in granites (Nara et al., 2011; Sano et al., 1992; Takemura and Oda, 2006). Moreover, the intrinsic characteristics of the granite (mineralogy and texture) also impact the type of microcracking generated by FT (inter-, intra- or transcrystalline) and hence rock petrophysical properties and ultimately durability.

The matrix (Yavuz, 2011), pore size and pore size distribution are especially important factors in granite resistance to ice crystallisation. Many authors (Haynes and Sneek, 1972; Wolfenden and Winslow, 1991; Mallidi, 1996; Benavente et al., 2007; Martínez-Martínez et al., 2013,) contend, based on mercury intrusion porosimetry findings, that intra-pore crystallisation is favoured by slow capillary kinetics, while others (Oguchi and Yuasa, 2010) claim that these developments are driven by fast capillary kinetics.

The present study explored the physical and mechanical effects of FT testing on the quality of granite exported for use in construction. Microcracking favours soiling, lichen colonisation and in some cases, crystal detachment. An understanding of the performance of granite used in construction in climates prone to FT cycles will help

choose the most suitable material for each place and use in both new construction and restoration.

2. Materials and methods

2.1. Rock samples

The four granites selected for the study, monzo- and leucogranites from Sierra de Guadarrama (Central System) in central Spain, have been traditionally used as building materials in Madrid and surroundings and are now used worldwide (Figs. 1 and 2). Alpedrete (AL), Cadalso de los Vidrios (CA), Colmenar Viejo (CO) and Zarzalejo (ZA) granites (Fort et al., 2013) were studied to determine the effect of FT on their decay. These construction stones are found in plutons with different chemical compositions (Villaseca et al., 1998).

Alpedrete is a 350-km² monzogranite–granodiorite pluton with local porphyritic varieties located about 35 km north of the city of Madrid. The monzogranite has an equigranular texture with fine to medium crystals exhibiting small microgranular mafic enclaves.

Cadalso de los Vidrios is a biotitic leucogranite (Mejías et al., 2009) and monzogranite pluton; it lies about 65 km west of Madrid and covers 59 km². The monzogranite has an equigranular texture with medium to large crystals and local porphyry. The leucogranite, with fine crystals and a lower biotite content, was used for this study.

Colmenar Viejo is a monzogranite pluton located about 31 km north of the city of Madrid, characterized by very homogeneous greyish white rocks. Leucocratic, medium-to-coarse grain size, or even darker porphyritic varieties are occasionally present.

The Zarzalejo monzogranite pluton is located about 60 km northwest of the city of Madrid (García-del-Cura et al., 2008). Two

texturally different units can be distinguished: a grey unit and a porphyritic unit characterised by the presence of K-feldspar megacrystals in a medium-grained matrix. It exhibits microgranular mafic minerals with enclaves and xenoliths, usually sub-rounded or ellipsoidal with a quartz dioritic composition and sometimes with a porphyritic texture (feldspar phenocrystals).

The samples were selected from outcrops close to old quarries where the granite was fresh and fracture-free. Seven cubic ($5 \times 5 \times 5 \pm 0.5$ cm) specimens of each of the four types were extracted at a low cutting speed (120 rpm) and low strain.

The petrological characteristics of the specimens tested and examples of buildings built with the respective granites are listed in Table 1 (modified from Fort et al., 2011).

2.2. Freeze–thaw test (FT Test)

FT testing was conducted as specified in European standard UNE-EN, 12371, 2011 (with 280 instead of the stipulated maximum 240 cycles) in a FT chamber fitted with a control system to programme the FT cycles to an accuracy of ± 1.0 °C. As described in the standard, the specimens were water-saturated at 20 °C and atmospheric pressure for 48 ± 2 h. They were subsequently placed in an air-filled FT test chamber (dry conditions), where they were spaced no less than 10 mm apart and at least 20 mm from the side of the chamber. The temperature sequence in each 12-hour cycle were as follows: (i) the temperature was lowered from +20 to –8 °C in 2 h (dry conditions); (ii) and then to –12 °C in 4 h (dry conditions); (iii) the chamber was automatically filled with water in 0.5 h until the specimens were completely submerged at temperatures of 5 to 20 °C (wet conditions); (iv) the specimens remained

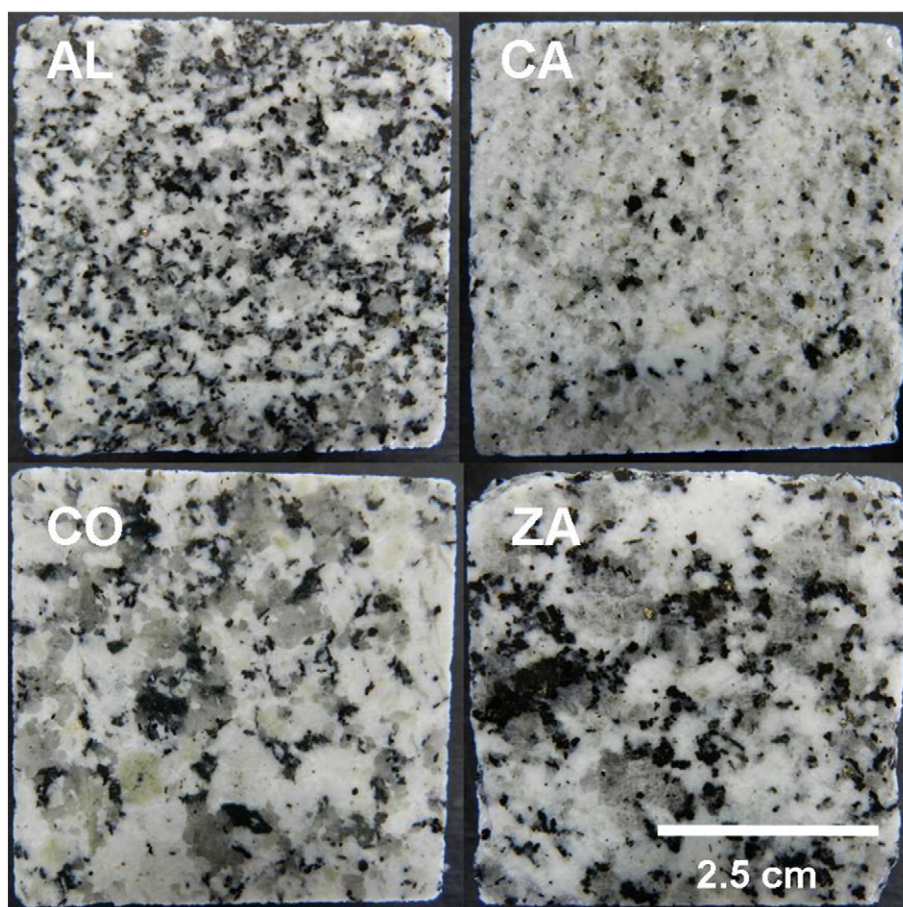


Fig. 1. Post-FT test surface (25 cm²) of four granite specimens; AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite.

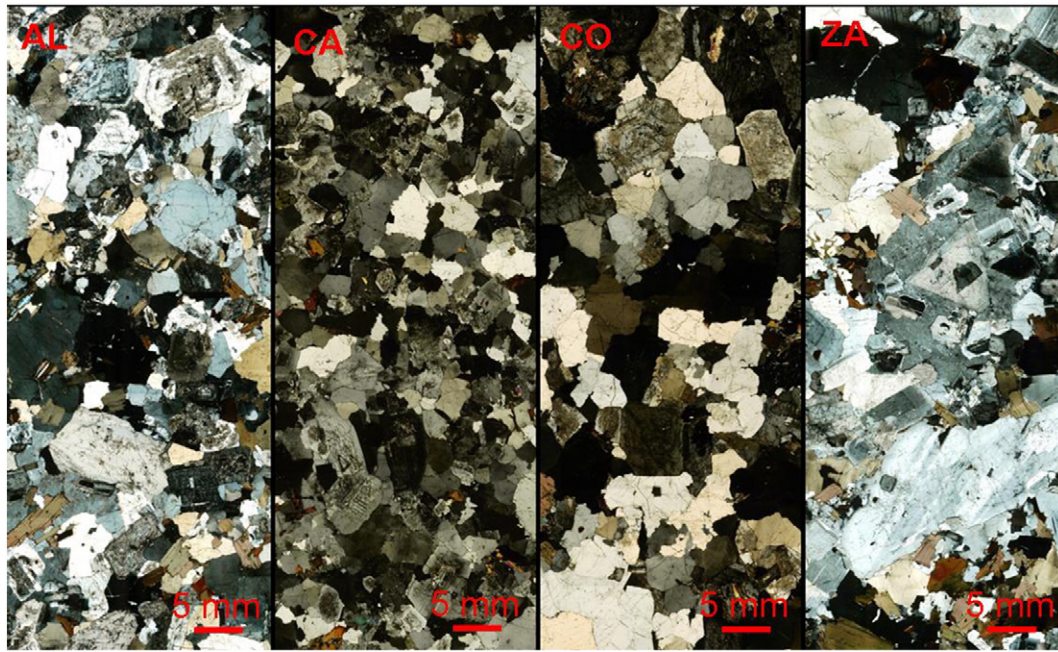


Fig. 2. Polarised light petrographic micrographs of the four granites studied; AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite.

submerged for 5 h; and (v) the water in the chamber was emptied in 0.5 h.

The specimens were removed from the FT chamber after every 70 FT cycles up to a total of 280 and dried in a ventilated oven at 70 °C. They were then visually inspected and tested for water saturation to quantify frost action. One of the seven samples of each variety of granite tested was reserved for Hg porosimetry analysis and fractography during FT testing.

2.3. Effective porosity (P_e)

P_e furnishes information on fractures, microcracks and pores generated during the FT cycles. P_e was therefore measured prior to the FT test and after every 70 cycles, up to and including 280. The samples were consequently tested for this parameter using the natural stone method described in Spanish and European standard UNE-EN, 1936, 2007. After oven-drying at 70 °C to a constant weight (variation in two consecutive weighings over 24 h <0.1%), they were

stored in a desiccator for 30 min. Set in a vacuum chamber at 2 kPa for 2 h, they were slowly submerged in water and subsequently stored at atmospheric pressure for 24 h to ensure full saturation. The P_e values were calculated from Eq. (1)

$$P_e(\%) = [(Ws - Wd) / (Ws - Wh)] \times 100 \quad (1)$$

where Wd is the weight of the dry specimens (after oven-drying at 70 °C and desiccation for 30 min). Ws is the weight of 24-h water-saturated sample, and Wh is the weight of the sample submerged in water.

2.4. Bulk density (ρ_b)

ρ_b was measured using also the Spanish and European standard UNE-EN, 1936, 2007, i.e., as the ratio between specimen mass and its bulk volume, from Eq. (2):

$$\rho_b = [(Wd) / (Ws - Wh)] \times 1000 \left(\text{kg/m}^3 \right). \quad (2)$$

Table 1

Four granites studied: type, petrographic description, accessory minerals and heritage buildings on which they are found.

Granite name	Type	Textural properties and mineralogical composition	Accessory minerals	Buildings
Alpedrete (AL)	Monzogranite	Medium-grained, hypidiomorphic, equigranular. Quartz (2–3 mm and 40–50% vol.), plagioclase (1–3 mm and 20–25% vol.), K-feldspar (microcline; 2–4 mm and 10–15% vol.) and biotite (1–2 mm and 10–15% vol.)	Ilmenite, cordierite, apatite, zircon and monazite.	Nuestra Señora de la Asunción Church-fortress at Alpedrete, Royal Palace and Alcalá Gate at Madrid.
Cadalso de los Vidrios (CA)	Leucogranite	Fine-medium-grained, hypidiomorphic, equigranular. Quartz (1–3 mm and 50–55% vol.), plagioclase (1–3 mm and 20–25% vol.), K-feldspar (1–4 mm and 20–25% vol.) and biotite (0.5–2 mm and 3–5% vol.)	Zircon, apatite, monazite, sphene, ilmenite, allanite and some opaque minerals.	Casa de los Austria, Asunción Church and Villena Palace at Cadalso de los Vidrios. Cork International airport. Vieux Port, Marseille.
Colmenar Viejo (CO)	Monzogranite	Medium-coarse-grained, heterogranular. Quartz (2–7 mm and 30–40% vol.), plagioclase (2–7 mm and 20–25% vol.), K-feldspar (3–6 mm and 20–25% vol.) and biotite (1–5 mm and 7–10% vol.)	Cordierite, muscovite, apatite, zircon and opaque minerals.	Roman road and Asunción Basilica at Colmenar Viejo.
Zarzalejo (ZA)	Monzogranite	Coarse-grained, hypidiomorphic, heterogranular. Quartz (2–7 mm and 30–40% vol.), plagioclase (3–9 mm and 15–20% vol.), K-feldspar (4–9 mm and 25–30% vol.) and biotite (2–6 mm and 10–15% vol.)	Apatite, zircon, opaque minerals and monazite.	San Pedro el Apóstol Church, Royal Monastery of San Lorenzo de El Escorial, Encarnación and Descalzas Reales Monasteries at Madrid. Royal Palace at Madrid y Moncloa Palace (restoration)

2.5. Ultrasonic pulse velocities (V_p and V_s)

The velocity of ultrasonic pulses travelling in a solid material depends on the density, porosity, mineralogy and elastic properties of the material (Wang et al., 2007; Yarbaş et al., 2007). Ultrasonic pulse velocity provides an accurate measure of the total damage to the material (Takarlı et al., 2008), while fracture measurement affords an indication of the nature of the damage, i.e., whether the loss in V_p and V_s were more likely to have been induced by the generation of new or the extension of existing microcracks.

V_p measurements were taken with CNS Electronics PUNDIT equipment (precision: $\pm 0.1 \mu\text{s}$) further to Spanish and European standard UNE-EN, 14579, 2005 recommendations. The even and round (11.82 mm in diameter) 1 MHz transducers were affixed to the stone surface with Henkel Sichozeil Kleister (a carboxymethyl cellulose) paste and water to enhance the transducer-stone contact and bond.

V_p was measured on each sample in the three orthogonal directions, using the mean of four consecutive measurements on each side of the cube as the accepted value. V_p was determined before the FT test and after 140 and 280 cycles.

V_s was taken with a Panametrics 5058 PR high voltage pulser-receiver connected to a Tektronix digital phosphorus oscilloscope (Model TDS 3012B).

Panametrics V151, 25.4-mm diameter, 0.5-MHz even and round transducers were affixed to the stone surface with a coupling gel consisting of 80% sugar (primarily fructose and glucose) and 20% water to enhance the transducer-stone contact and bond. The pulse repetition rate was 20 Hz and damping 200 Ω .

V_s was measured on each sample in the three spatial directions, taking the mean for each specimen as the accepted value. V_p was determined before the FT test and after 280 cycles. V_p and V_s were then used to compute Young's modulus (E_{dyn}) from the Darracott and Orr (1976) equation (Eq. (3)) and the V_p/V_s ratio.

$$E_{dyn} = \rho \left[3 \frac{V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2} \right] / \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

where V_p is the longitudinal wave value (m/s); V_s is the transverse wave value (m/s); E_{dyn} is the Young's modulus (Pa); and ρ , is the bulk density (kg/m^3).

The conversion from dynamic to static modulus was based on Sousa's (2014) equation: $E_{st} = 0.99E_{dyn} - 0.92$.

2.6. Mercury intrusion porosimetry (MIP)

MIP was conducted on a single prismatic specimen (12 ± 2 mm in diameter and 20 ± 2 mm high) cut from an upper corner of one of the cubic specimens. The analysis was run before and after FT testing on samples oven-dried to a constant weight at 70 °C. A Micromeritics' Autopore IV 9 520 porosimeter with a maximum pressure of 414 MPa (60,000 psi) was used to assess sample pore structure, including total porosity (pore diameter range: 0.001–400 μm), macro- and micro-porosity and pore size distribution. The cut-off between micro- and macro-porosity was set at a pore diameter of 5 μm (Fort et al., 2011; Rodríguez and Sebastián, 1994; Russel, 1927).

2.7. Fractography

A $30 \times 20 \pm 3$ mm thin section measuring, 30 μm thick was sectioned from one specimen of the AL, CA and ZA before FT testing and after each series of 70 cycles. Identical thin sections were cut from CO after 0, 70, 140 and 280 cycles. To ensure the thin section was removed from a surface of the specimen exposed to all FT cycles, successive thin sections were sawn off parallel to and within 1 cm of the surface. Sawing was performed at low speed (120 rpm) and low strain so as not to generate artefacts (microcracks).

The thin sections were impregnated with fluorescence and characterised under an Olympus BX 51 polarized light microscope (PM) fitted with DP 12-coupled (6 V/2.5 Å) Olympus digital micrography and Olympus DP-Soft software (version 3.2). Cracks were characterised with the same equipment, as well as with the same set-up using an Olympus U-RF-T mercury lamp fluorescence microscope (FM).

PM and FM micrograph mosaics (Gale et al., 2010) were made from the thin sections to monitor microcrack development. Each mosaic comprised 40 micrographs of the same area, measuring approximately 4.5 cm^2 . The cross-Nicols micrograph mosaics were used for mineral quantification, and the fluorescence mosaics to study cracks. One fragment of the FM mosaic was laid over the same fragment of the PM mosaic and two squares were drawn on the resulting image, one measuring 1 cm^2 and the other 0.25 cm^2 . The sides of these squares were drawn parallel to the two sides of the original FT-tested cubic specimen (Fig. 3). Fracturing was quantified by counting the total number of microcracks that intersected with the sides of these squares, as well as the number that cut across quartz, feldspar and mica. A distinction was also drawn among microcracks found along the edge (intercrystalline) or inside (intracrystalline) crystals or that impacted more than one grain (transcrystalline). Intercrystalline microcracks were subdivided by the mineral interface involved: quartz/feldspar, quartz/biotite or feldspar/biotite. Lastly, the linear crack density (LCD) (Sousa et al., 2005) was calculated as the number of microcracks per millimetre. In other words, the LCD was found by counting the number of each type of fracture intersecting the boundary lines, with a total length of 50 mm, of the squares drawn on the mosaic.

3. Results

3.1. Bulk density (ρ_b), weight loss and effective porosity (P_e)

Initial ρ_b was similar in the four granites, ranging from 2 602 kg/m^3 in CA to 2 668 kg/m^3 in AL, and varied very little throughout the FT test: from 0.2% in CA to 0.6% in ZA. The initial P_e was low, at 0.7% in CO to 1.7% in ZA. The lowest post-FT cycle weight loss was recorded for CA and CO (0.6%) and the highest for ZA (1.1%). Porosity rose in all the granites after the FT cycles. Pre- and post-test weight, ρ_b and P_e of specimens are given in Table 2.

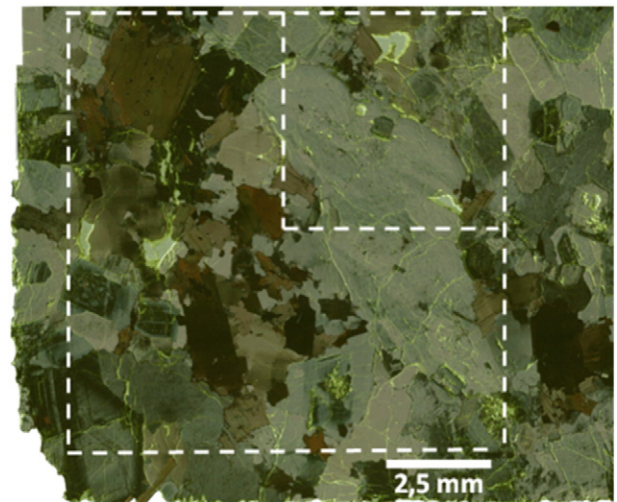


Fig. 3. Thin section of ZA specimen: fragment of an FM micrograph mosaic overlaid on the same fragment of a PM micrograph mosaic, showing the sides of the two squares (50 mm, linear) on which LCD was measured.

Table 2

Pre- and post-FT test values of effective porosity and bulk density in four granite varieties.

Granite	Cycle 0		Cycle 280				
	Effective porosity (%)	Bulk density (kg/m ³)	Effective porosity (%)	Bulk density (kg/m ³)	Δ Weight (%)	Δ Effective porosity (%)	Δ Bulk density (%)
AL	0.8 ± 0.08	2 668 ± 18	0.9 ± 0.22	2 660 ± 7	−0.9	10.5	−0.3
CA	1.2 ± 0.20	2 602 ± 16	1.3 ± 0.18	2 596 ± 45	−0.6	6.0	−0.2
CO	0.7 ± 0.12	2 629 ± 13	0.8 ± 0.16	2 620 ± 5	−0.6	7.1	−0.3
ZA	1.7 ± 0.06	2 657 ± 15	1.9 ± 0.01	2 640 ± 26	−1.1	11.6	−0.6

3.2. Cracks

Initial cracking was greatest in CA, followed in descending order by ZA, AL and CO granites. Crack rates rose with the FT cycles in all the materials studied (Table 3).

LCD rose steeply in CA after the first 70 cycles, but more moderately from then on through the end of the test. From the 70th to the 280th cycle, the pace was similar to the crack generation rate observed in CO, which held steady throughout the test. Total crack generation in CO was much more linear than in the other granites and post-280 cycle fracturing was also lowest in this variety.

The highest post-FT LCD was observed in ZA, where the fracture rate in the first 70 cycles was nearly as low as in AL and CO. The sharp rise was recorded after 140 and 210 cycles.

3.2.1. Relationship between type of fracturing and minerals involved

The same trend was observed in the four granites: similar numbers of existing microcracks were found, mostly in quartz and feldspar. No pre-cracking was detected in biotite.

Quartz exhibited the steepest rise in fracturing in the first 70 cycles, after which the slope of the curve tapered (Fig. 4). Fracturing rose more sharply in feldspar in the final series, except in CA where the slope was steepest in the first 140 cycles. Very few microcracks developed in biotite. The earliest microcracks were observed in ZA after the first 70 cycles, whereas in the other granites no microcracking appeared until after 140 cycles or even after 210 cycles (CA).

3.2.2. Inter-, intra- and transcrystalline microcracks

Before FT testing, intercrystalline microcracks prevailed over the intracrystalline type. Intracrystalline microcracks grew in number as the FT test advanced. ZA had more intra- than intercrystalline microcracks after 70 cycles; CA had more intra- than intercrystalline microcracks after 140 and AL after 210, while CO only exhibited more intra- than intercrystalline microcracks after 280 cycles (Fig. 5). In AL, the number of intracrystalline microcracks remained more or less constant through the first 140 cycles, growing after 210. With a sharper rise in the number of inter- than intracrystalline microcracks after 210 cycles, however, this was the only granite that had a larger number of intercrystalline than intracrystalline microcracks at the end of the FT test.

CA exhibited the lowest increase (30%) in LCD for intercrystalline microcracks. The increase in intercrystalline microcracks was greatest in AL (180%). The largest increase in intracrystalline microcracks,

505%, was recorded for ZA, compared to 192% for AL, where it was lowest (Table 4, Fig. 5).

3.2.3. Relationship between fracture type (inter-, intra- trans-crystalline) and crystals

The proportion of inter-, intra- and transcrystalline microcracks in each granite varied with the number of FT cycles (Table 4). The fracture network was primarily intercrystalline in the earliest series. With each new series, feldspar developed more intracrystalline microcracks along its crystallographic planes of weakness. Biotite had the fewest intercrystalline microcracks.

The number of intercrystalline microcracks affecting quartz grew moderately in all four granites, by 12% in ZA to a maximum of 61% in AL. The intracrystalline microcracks in quartz rose more rapidly, by a minimum of 80% in CO to a maximum of 625% in AL. The number of intercrystalline microcracks increased more in feldspar than in quartz, from 35% in CA to 225% in AL. The number of intracrystalline microcracks after 280 cycles, in the four granites studied, is higher inside feldspar than inside quartz (Table 5). Fig. 6 shows the pre- and post-FT testing microcracks for the four granites studied.

3.3. Ultrasonic pulse velocities (V_p and V_s)

Each granite had a characteristic initial V_p and V_s . The highest initial V_p was found in CO (5051 ± 349 m/s), followed by AL (4620 ± 163 m/s), CA (3687 ± 300 m/s) and lastly ZA (3219 ± 204 m/s). V_p declined after the FT cycles in all four varieties of granite. The rate of decline in their post-280-cycle V_p was 2.8% in CO, 2.9% in CA, 3.8% in AL and 5.2% in ZA.

The highest initial V_s was found in AL (3812 ± 107 m/s), followed by CO (3494 ± 94 m/s), CA (2596 ± 110 m/s) and lastly ZA ($22,116 \pm 89$ m/s). V_s declined after the FT cycles in all four varieties of granite. The rate of decline in their post-280-cycle V_s was 2.7% in CO, 2.8% in AL, 3.0% in CA and 4.7% in ZA. The V_p/V_s ratio was similar for all granites: AL = 1.2; CA = 1.4; CO = 1.4 and ZA = 1.4.

E_{dyn} was initially highest in CO, followed by CA, AL and lastly ZA. E_{dyn} declined after the FT cycles in all four varieties of granite. The specimens exhibited different rates of decline in their post-280-cycle V_s values: 5.8% in CO, 6.0% in CA, 10.2% in ZA and 21.9% in AL. Table 6 gives E_{dyn} and E_{st} for the four types of granites tested.

3.4. Mercury intrusion porosimetry (MIP)

According to the Hg intrusion findings, the granite with the highest initial porosity was ZA followed by CA, CO and AL in descending order. Porosity as determined by Hg intrusion rose during FT testing in all the granites except CO (Table 7).

The initial microporosity followed essentially the same pattern as porosity in the four granites, i.e., the greatest microporosity was observed in ZA and CA, followed by AL and CO. Microporosity also rose in all four materials after the FT cycles. The pore size distribution graphs (Fig. 7) showed a rise in microporosity in all the granites: by 7.6% in ZA, 15.1% in CA, 16.3% in AL and 25.4% in CO.

Table 3

Linear crack density (LCD) for four granite varieties, before FT testing and after 70, 140, 210 and 280 cycles.

Linear crack density by number of FT cycles (cracks per millimetre)						
Granite	0	70	140	210	280	Δ 0 to 280 (%)
AL	1.1	1.3	1.44	2.48	3.22	193
CA	1.82	2.94	3.14	3.4	3.76	107
CO	0.92	1.36	1.52	–	2.3	150
ZA	1.2	1.58	3.02	3.8	3.94	228

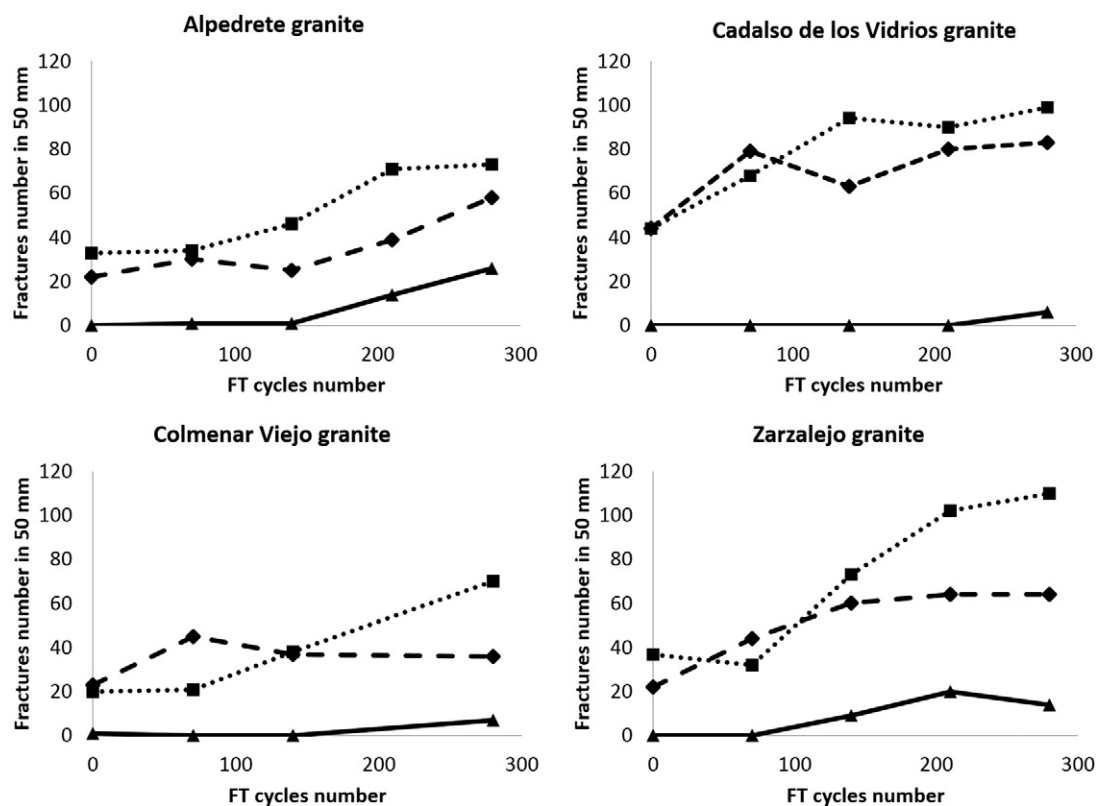


Fig. 4. Number of fractures in 50 mm (linear) of the four granites exposed to FT test, by mineral: quartz (rhombi), feldspar (squares) and biotite (triangles).

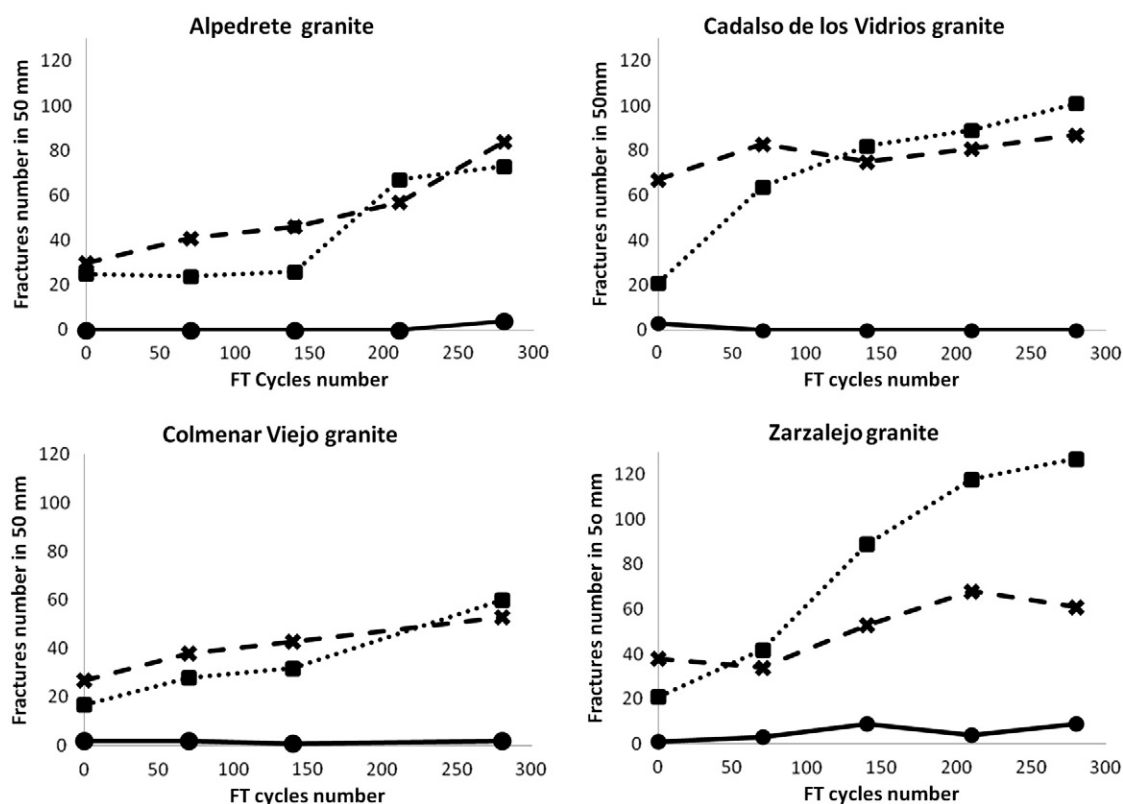


Fig. 5. Number of microcrack developing vs. number of FT test cycles by type of microcrack and granite studied (inter-crystalline microcracks: x-marks; intra-crystalline microcracks, squares; trans-crystalline microcracks: circles).

Table 4
Inter- and intracrystalline linear crack density (LCD) after FT testing for four granites.

Linear crack density (cracks per millimetre) by FT cycle fracture type												
Granite	0 cycles		70 cycles		140 cycles		210 cycles		280 cycles		Δ 0 to 280 (%) Inter	Δ 0 to 280 (%) Intra
	Inter	Intra	Inter	Intra	Inter	Intra	Inter	Intra	Inter	Intra		
AL	0.6	0.5	0.82	0.48	0.92	0.52	1.14	1.34	1.68	1.46	180	192
CA	1.34	0.42	1.66	1.28	1.5	1.64	1.62	1.78	1.74	2.02	30	381
CO	0.54	0.34	0.76	0.56	0.86	0.64	–	–	1.06	1.2	96	253
ZA	0.76	0.42	0.68	0.84	1.06	1.78	1.36	2.36	1.22	2.54	61	505

4. Discussion

Other FT studies conducted on granite under conditions similar to those described here (Del Río et al., 2005; García-del-Cura et al., 2008; Jamshidi et al., 2013; Karaca et al., 2010; Liu et al., 2012), in which fewer than 70 cycles were run, could not determine the changes actually impacting these materials. Ruedrich et al., 2011 noted that clear evidence of damage was only observable after over 50 FT cycles, although the FT testing conditions, i.e., temperature, cooling rate and water pressure inside the microcracks, affect microcrack generation and damage substantially. In nearly 100% saturated, closed system rocks, volumetric expansion is the ice crystallisation mechanism that governs microcracking. These were not the conditions prevailing in the present tests nor in granites used as ashlar or façade cladding, however. Such rocks may be affected by ice segregation, another mechanism that induces microcracking and hence deterioration. The suction temperature induced by the FT chamber generated a freezing gradient in the granite samples, with ice concentrating on the surface of the specimens. The water inside the granites migrated through the microcracks to the surface, where the ice grew, inducing surface microcracks. Murton et al. (2006) contended that for ice segregation to prompt microcracking in highly porous chalk, the temperature must hover around 0 °C, whereas Walder and Hallet (1985) claimed that in low porosity rock such as granite cracking is most intense when the temperature ranges from –4 to –15 °C at a rate of 0.1 to 0.5 °C/h. At the cooling rate and temperatures proposed in Spanish and European standard UNE-EN, 12371, 2011 and used here, i.e., 14 °C/h in the temperature range +20 to –8 °C and 1 °C/h between –8 and –12 °C, ice crystallised on the specimen surface. This may have

occurred when the outside temperature was below zero and the temperature inside the specimens was above zero, enabling the interstitial water to flow across the microcracks to the surface.

The petrophysical and mechanical properties of studied in the four granites varied to some degree after the FT cycles. CO exhibited the lowest LCD, MIP, P_e and the highest V_p , V_s and E_{st} , denoting a higher resistance to FT. Conversely, ZA showed the least resistant post-FT test petrophysical and mechanical characteristics.

The smallest rise in P_e , ρ_b , LCD and weight loss was observed in CA. These factors also increased minimally in CO, which had the lowest decline in V_p . The smallest growth in microporosity was recorded for ZA, the granite with the steepest rises in P_e , ρ_b , weight loss and LCD and the sharpest decline in V_p . As CA has a smaller crystal size than the other granites, it exhibited the highest initial and final intercrystalline LCD. ZA, the granite with the largest crystal size due to the presence of large feldspar crystals, developed the highest number of intracrystalline microcracks.

Through the first 70 FT cycles, microcrack development was similar in the four granites. The intercrystalline type initially accounted for 54 to 64% and after the 70th cycle, from 56 to 63% of all the cracking detected, except in ZA, which after the 70th cycle had 43% intercrystalline microcracks. Following the first 70 cycles, all the granites developed more intracrystalline microcracks, albeit in different proportions. At the end of the test (280 cycles), intracrystalline microcracking predominated in all except AL. This result was consistent with prior granite weathering studies (Sousa et al., 2005), which reported intracrystalline microcracks to be the most frequent form of cracking.

Takemura et al. (2003) and Takemura and Oda (2004), who also distinguished between microcracks in quartz and feldspar (as well as in terms of grain boundaries), found that microcrack generation differed in these minerals. The present quantification of microcracks on PM and FM micrographs showed that intracrystalline fracturing was greater in feldspar than in quartz. Sousa et al. (2005) reported that over half of the cracks detected in ornamental granites were intracrystalline and located on feldspar crystals. These authors noted that microcracks often appeared in the cleavage direction, a finding observed as well in the scanning electron microscope images published by Manchao et al. (2010).

The FT test induced greater inward confinement stress in the cracks developing along both the edges of the crystals and their planes of weakness. Nonetheless, no microcracking was found in the areas between quartz and biotite, inasmuch as the laminar texture of biotite affords its sufficient flexibility and ductility to reduce cracking, particularly in the cleavage direction. In other types of accelerated ageing tests (salt crystallisation) conducted on AL and ZA (López-Arce et al., 2010), biotite was observed to be more heavily impacted by surface microcracks. However, according to the present FM findings for thin sections taken at a depth of 1 cm, biotite was the mineral that developed the fewest fractures inside the granite.

Scant transcrystalline microcrack proliferation was observed in all four granites. Transcrystalline microcracking appeared in different forms and at different stages of the FT test. Transcrystalline microcracks, which were larger than the inter- and intra-crystalline varieties, were the result of interconnections, normally when an intercrystalline fracture spread in the cleavage direction. Microscopic

Table 5
Number of intra- and intergranular microcracks (affecting a line of 50 mm) in quartz and feldspar for four granites.

Granite	Microcracks type	Quartz microcracks					
		0 cycles	70 cycles	140 cycles	210 cycles	280 cycles	Δ (%)
AL	Inter	18	20	18	21	29	61
	Intra	4	10	7	18	29	625
CA	Inter	33	46	28	37	37	12
	Intra	11	33	35	43	46	318
CO	Inter	13	26	20	–	18	38
	Intra	10	19	17	–	18	80
ZA	Inter	16	20	21	27	22	37
	Intra	6	24	39	37	42	600
Granite	Microcracks type	Feldspar microcracks					
		0 cycles	70 cycles	140 cycles	210 cycles	280 cycles	Δ (%)
AL	Inter	12	20	27	29	39	225
	Intra	21	14	19	42	34	62
CA	Inter	34	37	47	44	46	35
	Intra	10	31	47	46	53	430
CO	Inter	13	12	23	–	31	138
	Intra	7	9	15	–	39	457
ZA	Inter	22	14	28	31	31	41
	Intra	15	18	45	71	79	426

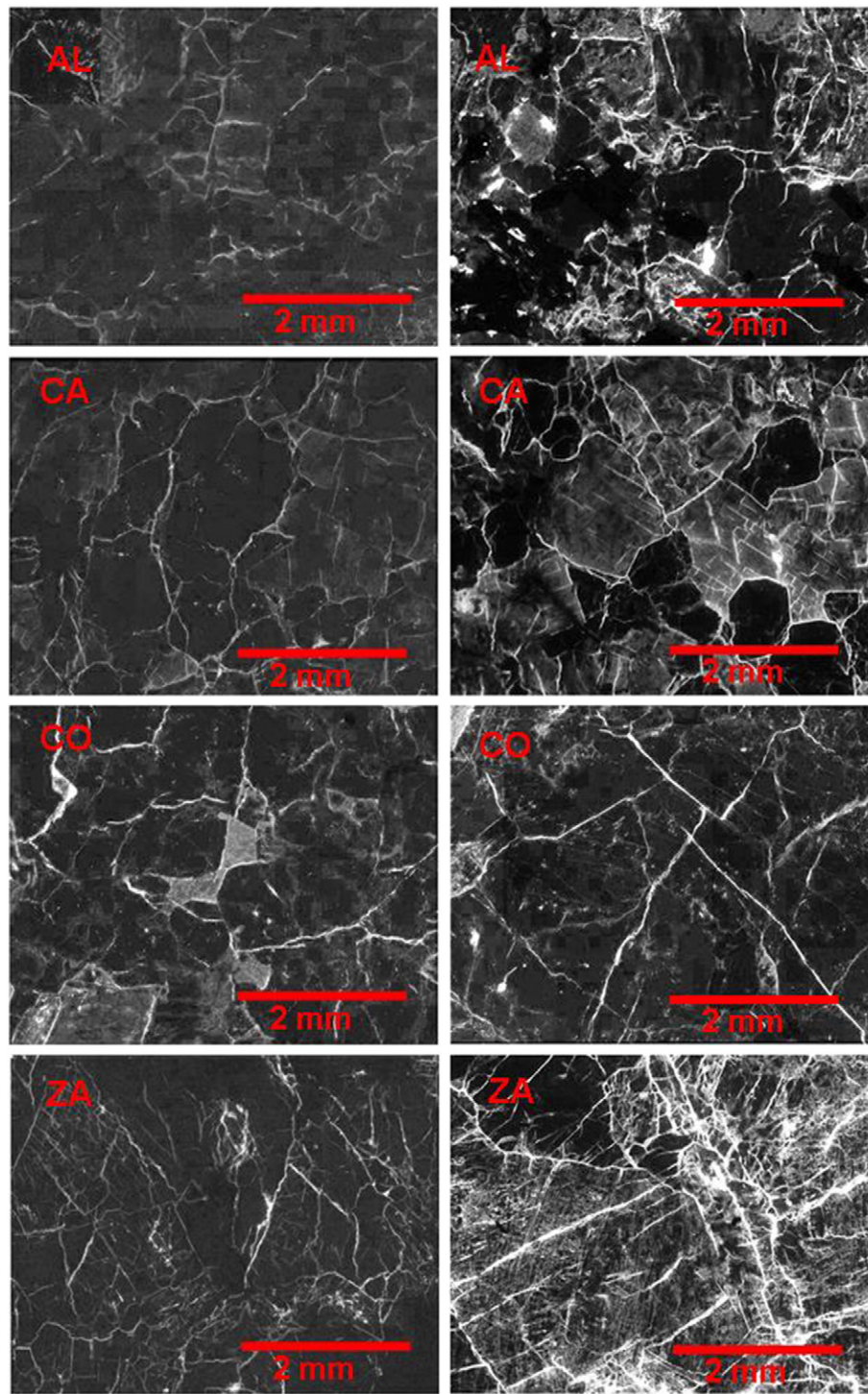


Fig. 6. Fluorescence microscope images of granite samples (AL: Alpedrete granite, CA: Cadalso de los Vidrios granite, CO: Colmenar Viejo granite, ZA: Zarzalejo granite); left: before FT testing; right: after 280 FT cycles.

quantification of the fractures showed that ZA exhibited the largest number of transcrystalline fractures, weakening inter-crystalline boundaries and favouring grain detachment. This finding is consistent with the fact that weight loss was greatest in ZA.

These fractures were the reason that the P_e was greater than could be detected with MIP, which detect microcracks $< 400 \mu\text{m}$. MIP nonetheless revealed a rise in microporosity in all the specimens. [Iñigo et al. \(2000\)](#) ruled out the use of MIP because the extremely high pressures required to fill the narrowest pores induce microcracking. The consistency among the findings for P_e , porosity and microporosity observed

with MIP in the present study before and after FT testing ([Table 5](#)) was an indication that MIP is suitable for this type of analyses. In fact, it is primarily used to determine microporosity, which rose in all the granites studied. Microporosity development was greatest in ZA, the most porous granite, and lowest in CO, the least porous granite studied.

[Tuğrul and Zarif \(1999\)](#) and [Yilmaz Günes et al. \(2011\)](#) reported an inverse relationship between K-feldspar crystal size and mechanical strength in granites. Larger crystals have longer edges, favouring the propagation of intercrystalline microcracks, while the cleavage typical of potassium feldspars, which act as the weakest planes, facilitates

Table 6

Pre- and post-FT test dynamic Young's moduli, E_{dyn} (Darracott and Orr, 1976) (left) and static Young's moduli, E_{st} (Sousa, 2014) (right) for four granites.

E_{dyn} Darracott and Orr, 1976			E_{st} Sousa, 2014	
$E_{dyn} = \rho [3 V_p^2 - 4 V_s^2] / [(V_p / V_s)^2 - 1]$			$E_{st} = 0.99 E_{dyn} - 0.92$	
Granite	Initial E_{dyn} (MPa)	Final E_{dyn} (MPa)	Initial E_{st} (MPa)	Final E_{st} (MPa)
AL	33.612	26.238	33.275	25.975
CA	35.377	33.243	35.023	32.910
CO	66.838	62.931	66.169	62.301
ZA	27.155	24.393	26.882	24.148

intragranular microcracking (Chen et al., 1999; Eberhardt et al., 1999; Wong et al., 2006). In the present study, the K-feldspar content in ZA, its larger crystal size and larger number of initial microcracks contributed to its lower E_{st} . Nonetheless, CO, with larger K-feldspar crystals than AL and CA, had a higher pre- and post-FT test E_{st} . That effect was the result of its lower pre- and post-trial micro- and effective porosities and its higher V_p than the other three granites. The PM and FM findings for each granite explain their E_{st} values. Despite the similarity in the number and size of potassium feldspar crystals in ZA and CO, the former exhibited the highest and the latter the lowest LCD. Microcracks generate strain under stress. Benmeddour et al. (2012) reported a linear correlation between E_{st} and porosity. The decline in E_{st} with exposure to FT cycles denotes a reduction in rock elasticity. However, E_{st} remained high after FT testing in all the specimens studied here was an indication that the granite underwent no severe internal damage, inasmuch as the cracks generated did not affect the inside of the samples.

The V_p/V_s ratios found for the granites studied resembled the values reported by Liu et al. (2012) for a granite subjected to 30 FT cycles. V_p/V_s remained essentially unchanged after FT testing in the present research because the deterioration induced in the four granites was not critical.

Table 7

Porosity and microporosity as determined by Hg intrusion for four granites: pre- and post-accelerated ageing.

Granite	Porosity (%)		Microporosity (%)		Δ (%) Porosity	Δ (%) Micro-porosity
	0 cycles	280 cycles	0 cycles	280 cycles		
AL	0.44	0.5	0.31	0.36	13.6	16.3
CA	0.95	0.96	0.67	0.77	1.1	15.1
CO	0.59	0.47	0.17	0.22	−20	25.4
ZA	1.4	1.48	1.06	1.14	5.5	7.6

Microcrack proliferation has adverse effects on granite quality, soiling building stones and favouring both lichen colonisation (De la Torre et al., 2010) and water circulation. Such cracking ultimately induces disaggregation, crumbling and detachment of the constituent crystals, with the concomitant loss of surface volume.

5. Conclusions

Parameters monitored in this study complement one another and are needed to quantify and assess granite microcracking during FT cycles. V_p and V_s are sensitive to the presence of microcracks but less sensitive to their number and type. This technique, which delivers valuable information for determining durability, affords the advantages of portability, ease of use and speed. P_e furnished information on the largest microcracks, while data on micropore development was gleaned from MIP.

While the four granites studied were mineralogically similar and the FT test conditions applied and ice crystallisation mechanisms were the same in all four, their clearly distinct textures explained their differential decay when exposed to FT cycles. The pre- and post-test findings

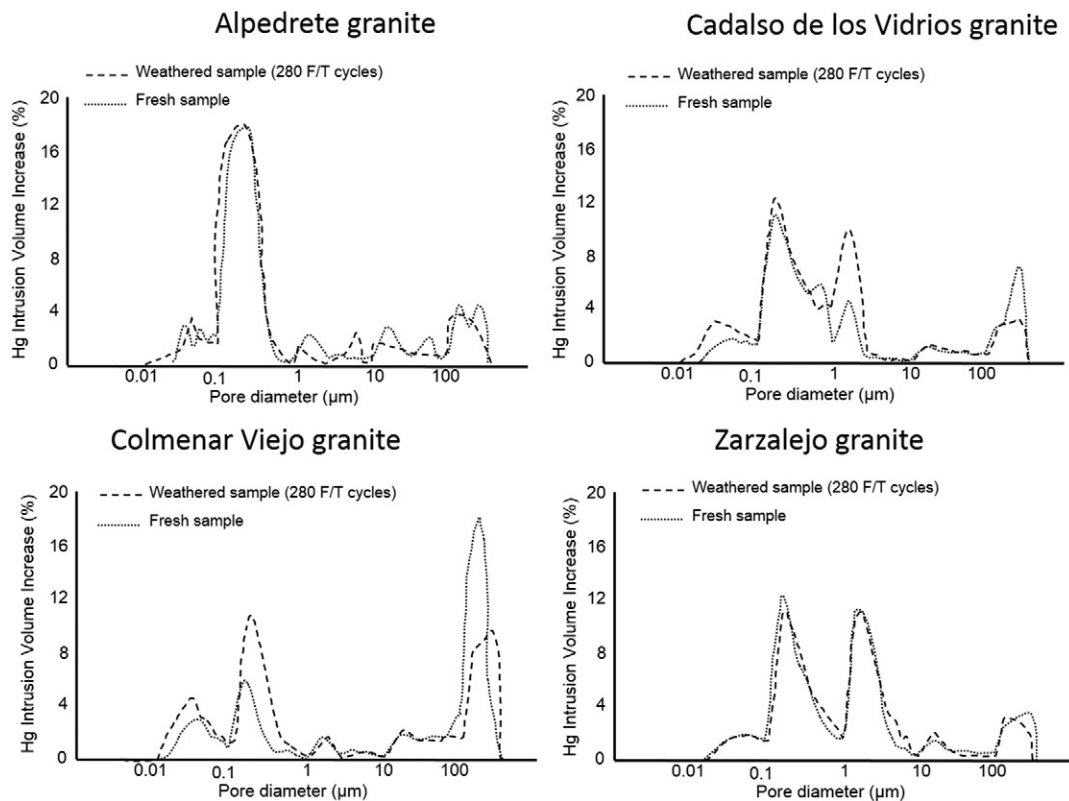


Fig. 7. Pore size distribution (PSD) graphs for four granites exposed to FT testing; dotted line: specimen pore size distribution of the specimens prior to FT testing; dashes: pore size distribution after 280 FT cycles.

provided clear evidence of the quality and durability of these four building granites and their resistance to FT events, attributable to their high density, low porosity and high V_p and V_s . Nonetheless, the FT test had an adverse effect on the petrophysical and mechanical properties of all the granites, in which microcracking was the main sign of the decay induced by the test.

Resistance to FT was greatest in CO due to its texture and especially to its lesser initial cracking, while ZA was the least resistant to FT testing. This lesser durability was attributable to the greater initial cracking and high feldspar crystal content in ZA.

Ice crystallises in microcracks existing in the granite, whose intrinsic properties determine microcrack development. Intracrystalline microcracking, especially along cleavage planes or areas of crystalline weakness, was greatest in feldspar and lowest in biotite. LCD rose most in the granite with the largest crystal size (ZA) and least in the granite with the smallest crystal size (CA). At the end of the test, ZA had the highest P_e , MIP, weight loss and LCD and the lowest V_p , V_s and E_{st} while the lowest decay was observed in CO. The granites where intracrystalline microcracks appeared earliest were the ones with the highest rate of decay.

The minor decline in E_{st} recorded for the four granites studied was an indication of their high mechanical resistance to FT, which would explain their centuries long endurance in good condition in heritage buildings, despite the microcracks observed in PM and FM analysis.

FT test conditions such as maximum and minimum temperatures, the minimum number of cycles and petrographic monitoring of weathering should be standardised for each type of rock. The number of FT cycles applied and the physical property used to quantify FT action differ among standards.

Acknowledgements

This study was funded by the Community of Madrid under the GEO-MATERIALS project (S2013/MIT-2914). The authors are members of the Complutense University of Madrid's Research Group: "Alteración y Conservación de Materiales Pétreos del Patrimonio" (ref. 921349). The authors wish to thank the Geological and Mining Institute of Spain for conducting the FT chamber tests. The petrophysical assessments were run at the IGEO Petrophysical Laboratory, affiliated with the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM) Heritage Laboratory Network (RedLabPat). The assistance, input and support provided by laboratory technicians Andrés Lira, Cristina Cedazo and Blanca Gallardo are gratefully acknowledged.

Manuscript edited by Margaret Clark, professional translator and English language science editor.

References

- Akakawa, S., Fukuda, M., 1991. Frost heave mechanism in welded tuff. *Permafrost Process.* 2, 301–309.
- Akesson, U., Lindqvist, J.E., G. ransson, M., Stigh, J., 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analyzing techniques. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 60, 277–284.
- Akesson, U., Stigh, J., Lindqvist, J.E., G. ransson, M., 2003. The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. *Eng. Geol.* 68, 275–288.
- Alm, O., Jaktlund, L.L., Kou, S., 1985. The influence of microcrack density on the elastic and fracture mechanical properties of Stripa granite. *Phys. Earth Planet. Inter.* 40 (3), 161–179.
- Arakawa, K., 1965. Theoretical studies of ice segregation in soil. *J. Glaciol.* 6 (44), 255–260.
- ASTM D5312/D5312M-12., 2013. Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions.
- Bayram, F., 2012. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze–thaw in cold regions. *Cold Reg. Sci. Technol.* 83–84, 98–102.
- Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García Del Cura, M.A., Cañaveras, J.C., 2007. The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environ. Geol.* 52, 197–206. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-006-0475-y>.
- Benmeddour, F., Villain, G., Abraham, O., Choinska, M., 2012. Development of an ultrasonic experimental device to characterise concrete for structural repair. *Constr. Build. Mater.* 37, 934–942.
- Brotóns Torres, V., Tomás Jover, R., Ivorra Chorro, S., 2014. Estudio de la influencia de la temperatura en las propiedades físicas y mecánicas de la calcarenita de San Julián. *Rehabend 2014, congreso latinoamericano. Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del Patrimonio*, pp. 469–476 (ISBN: 978-84-616-8863-0).
- Cárdenes, V., Mateos, F.J., Fernández-Lorenzo, S., 2014. Analysis of the correlations between freeze–thaw and salt crystallization tests. *Environ. Earth Sci.* 71, 1123–1134. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2516-7>.
- Carvalho, F., Chen, C.N., Labuz, J., 1997. Measurements of effective elastic modulus and microcrack density. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 3–4 (Paper No. 043).
- Chen, T.C., 2000. Study on mechanisms of rock deterioration and rock slope failures in cold regions. (PhD dissertation). Kitami Institute of Technology.
- Chen, Y., Nishiyama, T., Kusuda, H., Kita, H., Sato, T., 1999. Correlation between microcrack distribution patterns and granitic rock splitting planes. *Int. J. Rock Mech. Min.* 36, 535–541.
- Chen, T.C., Yeung, M.R., Mori, N., 2004. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze–thaw action. *Cold Reg. Sci. Technol.* 38, 127–136.
- Coussy, O., Fen-Chong, T., 2005. Mécanique de la cristallisation, pore relaxation and microcrack formation in cohesive porous materials. *C. R. Méc.* 333 (6), 507–512.
- Darracott, B.W., Orr, C.M., 1976. Geophysics and Rock Engineering. *Symp. On Exploration for Rock Engineering*. Johannesburg. 1, 159–164. Balkema, Cape Town/Rotterdam.
- De la Torre, R., Sancho, L., Horneck, G., de los Ríos, A., Wierzbos, J., Olsson-Francis, K., Cockell, C., Rettberg, P., Berger, T., De Vera, J.P., Ott, S., Martínez-Frías, J., González-Melendi, P., Mercedes-Lucas, M., Reina, M., Pintado, A., Demets, R., 2010. Survival of lichens and bacteria exposed to outer space conditions – results of the Lithopanspermia experiments. *Icarus* 208, 735–748.
- Del Río, L.M., López, F., Esteban, F.J., Tejado, J.J., González, M.I., Ramos, A., San Emeterio, J.L., 2005. Ultrasonic study of alteration processes in granites caused by freezing and thawing. *IEEE Ultrason. Symp.* 1, 415–418.
- DIN 52104, 1982. Testing of natural stone; freeze–thaw cyclic test. (Deutsche norm).
- Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999. Effects of grain size on the initiation and propagation of thresholds of stress induced brittle fractures. *Rock Mech. Rock. Eng.* 32, 81–89.
- Ehlen, J., 2002. Some effects of weathering on joints in granitic rocks. *Catena* 49, 91–109.
- Eissa, E.A., Kazi, A., 1988. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 25 (6), 479–482. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)90987-4](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(88)90987-4).
- Erguler, Z., Shakoor, A., 2009. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. *Eng. Geol.* 108, 36–42.
- Feng, X.Q., Yu, S.W., 2000. Estimate of effective elastic moduli with microcrack interaction effects. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 34, 225–233.
- Fort, R., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M., Freire-Lista, D.M., 2011. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural Stone. *J. Geophys. Eng.* 8 (1–13), S132–S144. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/8/3/S13>.
- Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M., Varas-Muriel, M.J., Freire-Lista, D.M., 2013. Evolution in the use of natural building stone in Madrid Spain. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 46, 421–429. <http://dx.doi.org/10.1144/qjgh2012-041>.
- Fujii, Y., Takemura, T., Takahashi, M., Lin, W., 2007. Surface features of uniaxial tensile fractures and their relation to rock anisotropy in Inada granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 44, 98–107.
- Gale, J., Lander, R., Reeda, R., Laubach, S., 2010. Modeling fracture porosity evolution in dolostone. *J. Struct. Geol.* 32, 1201–1211.
- García-del-Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A., Martínez-Martínez, J., 2008. The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers. *Mater. Constr.* 58, 289–290 (ISSN: 0465-2746 eISSN: 1988-3226).
- Gupta, A.S., Rao, K.S., 2001. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 60, 201–221. <http://dx.doi.org/10.1007/s100640100113>.
- Hall, K., Thorn, C., Sumner, P., 2012. On the persistence of 'weathering'. *Geomorphology* 149–150, 1–10.
- Hallet, B., Walder, J.S., Stubbs, C.W., 1991. Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained subzero temperatures: verification from an experimental study using acoustic emissions. *Permafrost Process.* 2, 283–300.
- Halsey, D.P., Mitchell, D.J., Dews, S.J., 1998. Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 31, 359–367.
- Haynes, J.M., Sneek, T., 1972. Pore properties in the evaluation of materials. 361. National Bureau of Standards Special Publication, pp. 669–675.
- Hor, M., Morihiro, H., 1998. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials. *Int. J. Eng. Sci.* 36 (4), 511–522.
- Hudec, P.P., 1998. Rock properties and physical processes of rapid weathering and deterioration. 8th International Congress of IAEG. 1, pp. 335–341.
- Ingham, J.P., 2005. Predicting the frost resistance of building stone. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 38, 387–399.
- Iñigo, A.C., Vicente, M.A., Rives, V., 2000. Weathering and decay of granitic rocks: its relation to their pore network. *Mech. Mater.* 32, 555–560.
- Iñigo, A.C., García-Talegón, J., Vicente-Tavera, S., Martín-González, S., Casado-Marín, S., Vargas-Muñoz, M., Pérez-Rodríguez, J.L., 2013. Colour and ultrasound propagation speed changes by different ageing of freezing/thawing and cooling/heating in granitic materials. *Cold Reg. Sci. Technol.* 85, 71–78.
- Jamshidi, A., Reza-Nikudel, M., Nikudel, H., Khamchian, M., 2013. Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model. *Cold Reg. Sci. Technol.* 92, 29–36.

- Karaca, Z., Deliormanli, A., Elçi, H., Pamukcu, C., 2010. Effect of freeze–thaw process on the abrasion loss value of stones. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 47, 1207–1211.
- Kieslinger, A., 1931. Das Volumen des Eises. *Geol. Bauwesen* 2, 199–207.
- King, M.S., 1983. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 20 (5), 237–241. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90004-9](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(83)90004-9).
- Lajtai, E.Z., 1998. Microscopic fracture processes in a granite. *Rock Mech. Rock Eng.* 31 (4), 237–250.
- Lam dos Santos, J., Amaral, P., Diogo, A., Rosa, L., 2013. Comparison of Young moduli of engineered stones using different test methods. *Key Eng. Mater.* 548, 220–230.
- Lindqvist, J.E., Akeson, U., Malaga, K., 2007. Microstructure and functional properties of rock materials. *Mater. Charact.* 58, 1183–1188.
- Liu, H., Niu, F.J., Xu, Z.Y., Lin, Z.J., Xu, J., 2012. Acoustic experimental study of two types of rock from the Tibetan Plateau under the condition of freeze–thaw cycles. *Sci. Cold Arid Reg.* 4 (1), 0021–0027.
- López-Arce, P., Varas-Muriel, M.J., Fernández-Revuelta, B., Álvarez de Buergo, M., Fort, R., Pérez-Soba, C., 2010. Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: surface roughness quantification. *Catena* 83, 170–185.
- Mallidi, S.R., 1996. Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze–thaw durability. *Constr. Build. Mater.* 10, 461–465.
- Manchao, H., Wen, N., Liqiang, H., Lijing, L., 2010. Microcrack analysis of Sanya granite fragments from rockburst tests. *Min. Sci. Technol.* 20, 0238–0243.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gómez-Heras, M., Marco-Castaño, L., García-del-Cura, M.A., 2013. Non-linear decay of building stones during freeze–thaw weathering processes. *Constr. Build. Mater.* 38, 443–454.
- Matias, J.M.S., Alves, C.A.S., 2001. Decay patterns of granite stones in Braga monuments (NW Portugal) historical constructions, 363–371.
- Matsuoka, N., 1990. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach. *Cold Reg. Sci. Technol.* 17, 253–270.
- Matsuoka, N., 2001. Microgelivation versus macrogelivation: towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering. *Permafrost. Periglac. Process.* 12, 299–313.
- Matsuoka, N., Murton, J., 2008. Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafrost. Periglac. Process.* 19, 195–210.
- Mejías, M., Renard, P., Glenz, D., 2009. Hydraulic testing of low-permeability formations: a case study in the granite of Cadalso de los Vidrios Spain. *Eng. Geol.* 107, 88–97.
- Miskovsky, K., Taborda Duarte, M., Kou, S.Q., Lindqvist, P.A., 2004. Influence of the mineralogical composition and textural properties on the quality of coarse aggregates. *J. Mater. Eng. Perform.* 13, 144–150.
- Murton, J.B., Peterson, R., Ozouf, J.C., 2006. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions. *Science* 314, 1127–1129.
- Mutlutürk, M., Altındag, R., Türk, G., 2004. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 237–244.
- Nara, Y., Kato, H., Yoneda, T., Kaneko, K., 2011. Determination of three-dimensional microcrack distribution and principal axes for granite using a polyhedral specimen. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 316–335.
- Nasser, M.H.B., Mohanty, B., 2008. Fracture toughness anisotropy in granitic rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45, 167–193.
- Oguchi, C.T., Yuasa, H., 2010. Simultaneous wetting/drying, freeze/thaw and salt crystallization experiments of three types of Oya tuff. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 59–72.
- Ozcelik, Y., Careddu, N., Yilmazkaya, E., 2012. The effects of freeze–thaw cycles on the gloss values of polished stone surfaces. *Cold Reg. Sci. Technol.* 82, 49–55.
- Powers, T.C., Helmuth, R.A., 1953. Theory of Volume Changes in Hardened Portland-cement Paste During Freezing. Highway Research Board. 32 pp. 285–297.
- Prikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variations in rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 671–682.
- Raisanen, M., 2004. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-litti complex, southeastern Finland. *Eng. Geol.* 74, 197–211.
- Rivas-Brea, T., Prieto Lamas, B., Silva Herme, B., 2008. Ensayos de alteración artificial aplicados a rocas graníticas. *Mater. Constr.* 58 (289–290), 179–189.
- Rodríguez, C., Sebastián, E., 1994. Técnicas de análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ing. Civil* 96, 130–142.
- Ruedrich, J., Siegesmund, S., 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environ. Geol.* 52, 225–249.
- Ruedrich, J., Kircher, D., Siegesmund, S., 2011. Physical weathering of building stones induced by freeze–thaw action: a laboratory long-term study. *Environ. Earth Sci.* 63, 1573–1586.
- Russel, S.A., 1927. Stone preservation committee report (Appendix I). H.M. Stationary Office, London.
- Sanjurjo, J., Alves, C.A.S., 2006. Degradación de rocas graníticas empleadas como material de construcción en edificios históricos de A Coruña (NW España). 31. Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe, pp. 11–28.
- Sano, O., Kudo, Y., Mizuta, Y., 1992. Experimental determination of elastic constants of Oshima granite, Barre granite, and Chelmsford granite. *J. Geophys. Res.* 97, 3367–3379. <http://dx.doi.org/10.1029/91JB02934>.
- Scherer, G.W., 1999. Crystallization in pores cement and concrete. *Cem. Concr. Res.* 29, 1347–1358.
- Shalkowshi, A., Kodama, Y., Nakano, S., 2009. The assessment of weathering stages in granites using an EC/pH meter. *Geomorphology* 105, 253–260.
- Siegesmund, S., Török, A., 2011. Building Stones. In: Siegesmund, S., Snethlage, R. (Eds.), *Stone in Architecture—Properties, Durability*, Fourth ed. Springer, Berlin, pp. 11–96.
- Sousa, L.M.O., 2014. Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 73, 569–588.
- Sousa, L.M.O., Suárez, del Río, Luis M., Calleja, L., Ruiz de Argandoña, V.G., Rodríguez, A., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Eng. Geol.* 77, 153–168.
- Tabor, S., 1929. Frost heaving. *J. Geol.* 37, 428–461.
- Tabor, S., 1930. The mechanics of frost heaving. *J. Geol.* 38, 303–317.
- Takarii, M., Prince, W., Siddique, R., 2008. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45, 1164–1175.
- Takemura, T., Oda, M., 2004. Stereology-based fabric analysis of microcracks in damaged granite. *Tectonophysics* 387, 131–150.
- Takemura, T., Oda, M., 2006. Changes in crack density and wave velocity in association with crack growth in triaxial tests of Inada granite. *Int. J. Jpn. Comm. Rocks Mech. Geophys. Res.* 2 (1), 13–16.
- Takemura, T., Golshani, A., Oda, M., Suzuk, K., 2003. Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, 443–454.
- Tan, X., Chen, W., Yang, J., Cao, J., 2011. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Reg. Sci. Technol.* 68, 130–138.
- TSE 699, 1987. Methods of Testing for Natural Building Stones. Institute of Turkish Standards, Turk Standartlan Enstitüsü (TSE), p. 82.
- Tuğrul, A., Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Eng. Geol.* 51, 303–317.
- UNE-EN 12371, 2011. Natural Stone Test Methods—Determination of Frost Resistance.
- UNE-EN 14579, 2005. Natural Stone Test Methods—Determination of Sound Speed Propagation.
- UNE-EN 1936, 2007. Natural Stone Test Methods—Determination of Real Density and Apparent Density and of Total and Open Porosity.
- Vanheerden, W.L., 1987. General relations between static and dynamic moduli of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 24 (6), 381–385.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S., Pamplona, J., 2008. Experimental characterization of the tensile behaviour of granites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45, 268–277.
- Villasaca, C., Barbero, L., Rogers, G., 1998. Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of Central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints. *Lithos* 43, 55–79.
- Walder, J., Hallet, B., 1985. A theoretical model of the fracture of rock during freezing. *Geol. Soc. Am. Bull.* 96, 336–346.
- Wang, D., Ma, W., Niu, Y.-N., Chang, X.-X., Wen, Z., 2007. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay. *Cold Reg. Sci. Technol.* 48, 34–43.
- Wolfenden, A., Winslow, D., 1991. Predicting the durability of paving bricks. *J. Test. Eval.* 19 (1), 29–33.
- Wong, R.H.C., Lin, P., Tang, C.A., 2006. Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression. *Mech. Mater.* 38, 142–159.
- Yarbaş, N., Kalkan, E., Akbulut, S., 2007. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze–thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Reg. Sci. Technol.* 48, 44–54.
- Yavuz, H., 2011. Effect of freeze–thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 70, 187–192.
- Yilmaz Günes, N., Mete Goktan, R., Kibici, Y., 2011. Relations between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 506–513.

6.4 Thermal shock-induced microcracking in building granite.

Engineering Geology (en revisión).

Freire-Lista, D.M., Fort, R. y Varas-Muriel, M.J.

El granito es una de las piedras de construcción más utilizadas en el patrimonio histórico de la Comunidad de Madrid y en edificios y obras civiles de nueva construcción de todo el mundo. Esta piedra se ve afectada por agentes de deterioro como el estrés térmico, que provoca una microfisuración que disminuye su calidad y durabilidad al hacerla más sensible al deterioro.

Cuatro granitos de construcción han sido sometidos a 42 ciclos de choque térmico según la norma Europea UNE-EN, 14066 (2003/2014). Las microfisuras han sido identificadas a partir de las modificaciones en las propiedades petrográficas, petrofísicas y mecánicas que se producen, analizadas con la combinación de técnicas destructivas y no destructivas. Se ha podido hacer un seguimiento de la microfisuración en los distintos minerales a lo largo del ensayo.

La mineralogía y textura de los granitos así como sus cambios fisico-químicos han jugado un papel importante en el desarrollo del deterioro. Los resultados mostraron que las microfisuras preexistentes coalescen y se crean otras nuevas a medida que avanza el proceso de deterioro.

Los mecanismos de deterioro en los cuatro tipos de granito sometidos a choque térmico es distinto. El granito de Zarzalejo ha sido el que más microfisuras ha desarrollado, mostrando un menor grado de calidad y durabilidad que los granitos de Colmenar Viejo y Cadalso de los Vidrios, que han sido los más resistentes a los procesos de choque térmico.

THERMAL SHOCK-INDUCED MICROCRACKING IN BUILDING GRANITE

Freire-Lista, D. M.^{a,b,*}, Fort, R.^{a,b}, Varas-Muriel, M.J.^{a,b,c}

^a*Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC – Complutense University of Madrid UCM. Madrid 28040, Spain*

^b*CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid 28040, Spain*

^c*Facultad de CC. Geológicas. Complutense University of Madrid UCM. Madrid, 28040, Spain*

*Corresponding autor.

E-mail addresses: d.freire@igeo.ucm-csic.es

Abstract

Granite is one of the stones most intensely used in the historic heritage and the de novo construction of buildings and civil works the world over. The microcracking induced in this stone by agents such as thermal stress detract from its quality and durability, making it more vulnerable to decay.

Four types of construction granite frequently used in both the built heritage and in de novo construction were exposed to 42 thermal shock cycles as specified in Spanish and European standard UNE-EN, 14066, 2003. Microcracks were detected due to changes in petrographic and petrophysical properties which, along with mechanical strength, were analysed using both destructive and non-destructive techniques. Mineral microcracking was monitored throughout the trial.

Granite mineralogy, texture and physical-chemical alteration were observed to play a prominent role in decay. The findings showed that pre-existing microcracks coalesced and generated further microcracking as decay progressed.

The decay mechanisms varied in the four types of granite studied. Microcracking was most intense in Zarzalejo granite, which exhibited lower quality and durability than Colmenar Viejo and Cadalso de los Vidrios granites, which were more resistant to thermal shock.

Keywords: decay, quality and durability, petrophysics, *Piedra Berroqueña*.

1 INTRODUCTION

Granite has been routinely used throughout history to build all manner of structures and remains popular today in light of its abundance, beauty and durability. Granite is found in heritage works such as castles, palaces, churches, bridges, dams and towers, to name a few. Beginning in the twentieth century, its structural role gave way to its use as insulation, façade cladding, flooring (García-del-Cura et al., 2008; Pires et al., 2014) or an aesthetic veneer. In addition to panelling or cladding, it can be made into elements sized for specific applications: handrails, staircases, fountains, bollards and benches, often in outdoor environments where they are exposed to weathering.

The propagation of microcracks (Anders et al., 2014) due to thermal shock affects the constituent minerals in granite differently. Microcrack geometry and density are the main parameters used to monitor the physical properties of stone (Yavuz, 2011). In granite, mechanical strength and resistance are related to its mineral composition (Miskovsky et al., 2004), the shape, size and spatial arrangement of its minerals (Akesson et al., 2003), its microstructural characteristics (Alm et al., 1985; Nasser et al., 2007) and crystal edges.

Granite decay (Taboada and García, 1999; Iñigo et al., 2000), which conditions its quality, depends on the stone's original petrographic and petrophysical characteristics (Fort et al., 2010, 2011; Freire-Lista et al., 2015a), use in or position on buildings (masonry) and the severity of the climate where it is used. This third factor may prompt physical and chemical changes in the internal texture of the rock.

Thermal stress has been studied in construction materials by a number of authors: Kranz (1983), Harmuth et al. (1996), Mutluturk et al. (2004), Lion et al. (2005), Sousa et al. (2005), Chaki et al. (2008), Dwivedi et al. (2008), Takarli et al. (2008), Wanne and Young (2008), Franzoni et al. (2013), Brotóns Torres et al. (2013, 2014) and Shao et al. (2014). When thermal stress is high and the material is unable to adapt quickly enough to accommodate the strain generated during cooling, microcracks appear (Hall, 1999; Hale and Shakoor, 2003; Yavuz, 2011; Demirdag, 2013) due to differences in expansion coefficients in the constituent minerals or even within the same mineral. That causes microstructural decay, with substantial changes in a rock's physical

and mechanical properties (Kern et al., 1997; Tuğrul, 2004; Schubnel et al., 2006). Microcracks may be inter-, intra- or transcrystalline and may cause mineral segregation (Freire-Lista et al., 2015a). Other forms of thermal stress-related decay in stone include changes in colour and gloss (Ozcelik et al., 2012).

The decay in stone induced by thermal stress is governed by essentially two mechanisms: thermal fatigue and thermal shock (Hall and Thorn, 2014).

Thermal fatigue may be associated with environmental heating and cooling cycles. It occurs in particular in areas with continental and desert climates characterised by significant differences in day and night time temperatures (Erguler and Shakoor, 2009), such as the Middle East (Saudi Arabia, Kuwait, Qatar and Yemen), certain continental regions of Asia, Australia, Europe and the United States, as well as in the tropics where the surface of stone exposed to intense solar radiation may be abruptly cooled by frequent rain. The continuous presence of nearby sources of heat (fireplaces, for instance) may also cause local thermal fatigue. Such fatigue is one of the main causes of decay affecting granite in the built heritage and plays a role in scaling (Halsey et al., 1998).

Thermal shock occurs under more aggressive circumstances than thermal fatigue, such as stone flaming or fire (Pires et al., 2014; Mambou, et al., 2015), which lead to earlier decay (Gómez-Heras et. al., 2009).

Several methods have been proposed to characterise thermal microcracking in rocks (Fredrich and Wong, 1986; Gokceoglu et al., 2009) developed models to predict the degree of granite weathering from stone porosity and P-wave velocity.

This study aimed to determine the effect of accelerated thermal shock ageing, conducted as specified in European and Spanish standard UNE-EN, 14066, 2003, in four types of granite with different textural characteristics used widely in heritage construction on the Iberian Peninsula and more recently in other areas of the world. The objective was to determine the quality and durability of these building stones with destructive and non-destructive techniques, quantifying the changes generated in their petrographic and petrophysical properties in response to microcrack generation.

Microcrack coalescence and the thermal shock-induced generation of further cracking induces decay in building granite that may be intensified by the action of other agents of decay, such as lichen colonies (De la Torre et al., 2010), pollution-related grime (Schiavon, et al., 1995) and graffiti (Rivas et al., 2012).

2 MATERIALS AND METHODS.

The decay caused by thermal shock (TS) test has been monitored in four granite buildings with 9 analytical techniques: Effective porosity (Pe), bulk density (ρ_b) Ultrasonic pulse velocity P (V_p) and S (V_s), dynamic Young's modulus (Edyn), mercury intrusion porosimetry (MIP), surface hardness (L), spectrophotometry and microcracking calculating Linear Crack Density (LCD) (Sousa et al. 2005).

2.1 Rock samples

The four granite samples selected for this study (Fig. 1) are Alpedrete (AL), Cadalso de los Vídrios (CA), Colmenar Viejo (CO) and Zarzalejo (ZA). These monzo- and leucogranites come from the Sierra de Guadarrama (Spanish Central System).

The samples used for the TS test were selected from outcrops close to the old quarries where granite was fresh. They were extracted and oriented according to the quarry. They are poorly fractured and have a similar tectonic history (De Vicente et al., 2007, Villaseca et al., 2012). Seven cubic ($5 \times 5 \times 5 \pm 0.5$ cm) specimens of each of the four types of granites were cut at a low speed (120 rpm) and low strain. These stones are popularly called “Piedra Berroqueña” and they have been used as a traditional building material in the Madrid area (Fort et al., 2013). Today, these granites continue to be used and some of them are exported as building granite. Quarries are located at a distance of between 35 and 60 km from the city of Madrid.

AL is a medium-grained, hypidiomorphic, equigranular monzogranite and has been used in the construction of important heritage buildings, including the Royal Palace (1738-1764) and the Puerta de Alcalá (1770-1778) in Madrid. This granite building has been nominated as “Global Heritage Stone Resource” (Freire-Lista et al., 2015b) for its heritage significance.

CA is a fine-medium-grained leucogranite, hypidiomorphic, equigranular has been used in heritage buildings such as the Palacio de Villena (XV century). Currently, under the trade name Blanco Cristal has been used in places such as Cork Airport, and shopping centers in China (Guangzhou, Shanghai).

CO is a medium-coarse-grained monzogranite, heterogranular. Used in archaeological sites from the 6th-7th century to important government buildings such as the Nuevos Ministerios complex in Madrid (1933-1942).

ZA is a coarse-grained monzogranite, hypidiomorphic, heterogranular, which has been used for the construction of the Monastery of San Lorenzo de El Escorial (1563-1584), in the restoration of the Royal Palace (1945), in shopping centers and enlargement of the Reina Sofia Museum (2001-2005), all of them in Madrid. This granite has been nominated as “Global Heritage Stone”. It is exported mainly as blocks to Turkey and Italy.

The mineralogy of the four granites is very similar (figure 1). The granite with smaller crystal size is CA, followed by AL, CO and ZA has larger crystal size.

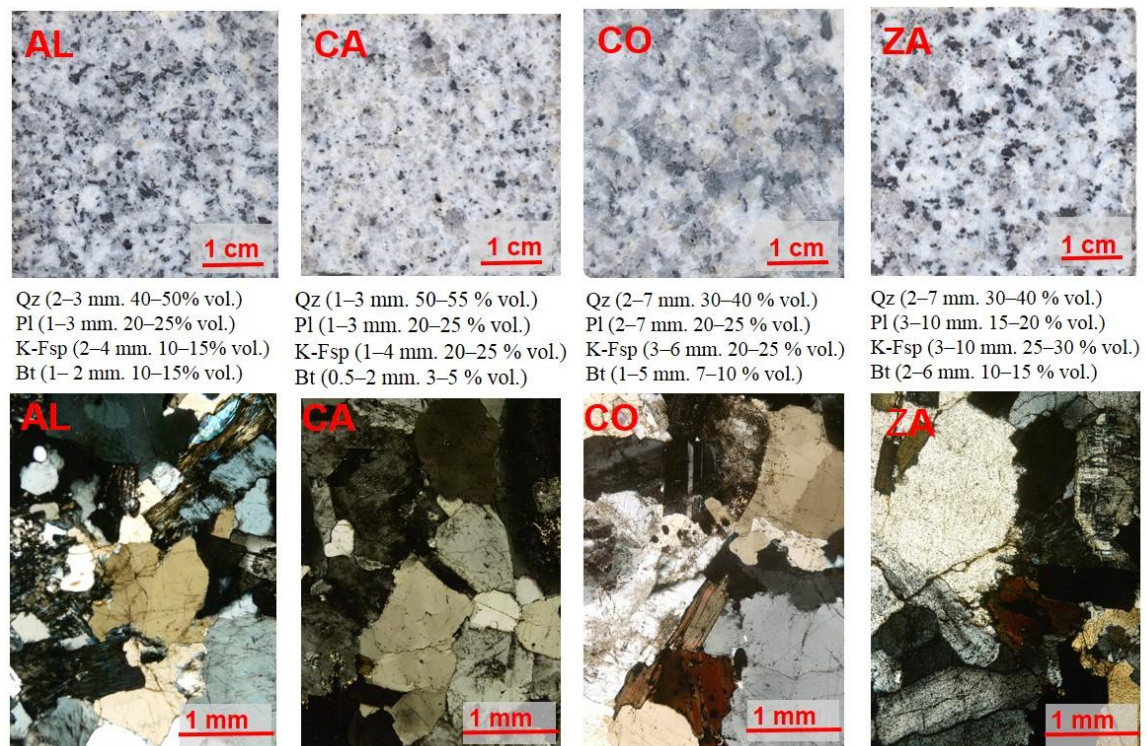


Fig. 1. Granite Alpedrete (AL), Cadalso de los Vidrios granite (CA), granite from Colmenar Viejo (CO) and Zarzalejo granite (ZA). Top: appearance in hand samples. Middle: mineralogy, and crystal size. Bottom: appearance petrographic microscope in crossed Nicols mode.

2.2 Thermal shock test (TS test)

Cycles were performed during 24 hours according to the European standard UNE-EN, 14 066, 2003 in the 7 cubes of each granite. First, the samples were put in an oven at $105 \pm 5^\circ \text{C}$ for 18 hours, then immersed in water at room temperature for 6 hours. This cycle was repeated 42 times.

2.3 Effective porosity (Pe)

To obtain information on the number of microcracks generated during the TS cycles. Pe was therefore found prior and after 42 TS cycles.

The granite samples were consequently tested for this parameter using the natural stone method described in the European standard UNE-EN, 1936, 2007. After the granite samples had reached a constant weight, they were placed in a vacuum chamber at 2 kPa for 2 hours and they were slowly submerged in water (room temperature) and then stored at atmospheric pressure for 24 hours, reaching water saturation. The Pe values were calculated from the Equation (1)

$$Pe (\%) = ((Ws - Wd) / (Ws - Wh)) \times 100 (\%) \quad (1)$$

Ws is the weight of 24 hours water-saturated sample, Wd is the sample dry weight, and Wh is the submerged in water sample weight.

2.4 Bulk density (pb)

The bulk density provides information about the microcracks produced during cycles of TS. pb was also found as per the European standard UNE-EN, 1936, 2007, as with the ratio between specimen mass and its bulk volume, from equation (2):

$$\rho_b (\%) = ((Wd) / (Ws - Wh)) \times 1000 (kg / m^3) \quad (2)$$

2.5 Ultrasonic pulse velocity (V_p and V_s)

Ultrasonic pulse velocity provides an accurate measurement of the total decay to the granite subjected to thermal processes (Reuschlé et al., 2006), the loss in ultrasonic P-wave pulse velocity (V_p) and ultrasonic S-wave pulse velocity (V_s). It has been induced coalescence of pre-existing microcracks and in new generations. Ultrasonic pulse measurements of V_p were taken with CNS Electronics PUNDIT equipment (precision: $\pm 0.1 \mu s$) following the European standard UNE-EN, 14579, 2007. The 1 MHz transducers (11.82 mm in diameter) were affixed to the granite surface with Henkel Sichozeil Kleister (a carboxymethyl cellulose) paste and water to enhance the transducer-stone contact.

V_p was measured on each of the 7 cubes of the 4 granites in the three orthogonal directions, using the mean of four consecutive measurements of each face of the cube as the accepted value. V_p was determined before the TS test and after 42 cycles.

A Panametrics High Voltage pulser-receiver (Model 5 058 PR) connected to a Tektronix digital phosphor oscilloscope (Model TDS 3 012 B) was used for ultrasonic pulse measurements of V_s . The even and round (Panametrics V151, 25.4 mm in diameter) 0.5 MHz transducers were affixed to the granite samples surface with a coupling gel composed 80% of sugars (principally fructose and glucose) and about 20% of water to enhance the transducer-stone contact and bond. The test conditions were: Pulse repetition rate, 20 Hz and damping 200 Ω . V_s was measured once on each face of the 7 samples of the 4 granites, i.e. In the three orthogonal directions, using the mean of the V_s in the three axes of each cubic specimen of each granite as the accepted value. V_s was determined before the TS test and after 42 cycles.

2.6 Young's modulus. (E)

In historic buildings it is not always possible to test directly mechanical strength, which involves breakage of the specimens. In this case the dynamic modulus must be obtained using non-destructive techniques (from the V_p and V_s) (Christaras et al., 1994).

Mechanical modules can help to identify changes due to weathering, as seen in the spread of microcracks within samples, often invisible on the surface, (Moses et al., 2014). This article presents Young's modulus values (Sousa, 2014) of each of the granites studied before and after the TS test.

V_p and V_s have been used to compute the dynamic Young's modulus (E_{dyn}), according to Darracott, 1976 Eqs (3), as well as in relation to V_p/V_s .

$$E_{dyn} = \rho b [3 V_p^2 - 4 V_s^2] / [(V_p/V_s)^2 - 1] \quad (3)$$

V_p is the value of ultrasonic P-wave pulse velocity (m/s); V_s means value of ultrasonic S-wave pulse velocity (m/s); E_{dyn} means dynamic Young's modulus (MPa); and ρb means bulk density (Kg/m^3).

2.7 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

The study of MIP was conducted on a single prismatic specimen (12 ± 2 mm in diameter and 20 ± 2 mm high) cut from an upper corner of one of the cubic granite specimens. The analysis was run before and after 42 TS tests on samples oven-dried at 70° C to a constant weight. A Micromeritics Autopore IV 9 520 porosimeter (maximum pressure, 414 MPa (60 000 psi); pore

throat diameter measuring range 0.001 to 400 μm) was used to give the pore distribution. The results has been divided between macroporosity (diameter > 5 μm) and micropores (diameter < 5 μm) (Russel, 1927).

2.8 Surface hardness (L)

Prior to the TS test, 7 cubes of each of the four granites have been dried to a constant weight. Surface hardness has been measured before and after the TS test using a rebound hardness testing electronic Equotip 3 (D), (Kawasaki et al., 2002; Aoki and Matsukura, 2007; Viles et al., 2011), with an impact energy of 11 N / mm, so that the impact does not cause too much decay to the samples. This equipment has been used to measure the effects of weathering on rock hardness (Kawasaki and Kaneko, 2004). Ten measurements were performed on each face of samples (6 × 25 cm²). The instrument was held vertically downwards and perpendicular to the flat surface within 5 mm of the cubes edges to avoid edge effects and care was taken to not select testing points close to the vicinity of voids visible on the rock surface.

A total of 60 measurements per sample have been taken and an average was calculated for each type of granite. The hardness value is expressed as the number of Leeb (L value), which is the ratio of the rebound velocity at impact velocity multiplied by 1000. L values are interpreted as being equivalent to rock strength. (Viles et al., 2011).

2.9 Colour

The parameters used in the CIELAB system (CIELAB 1976) are L *, a * and b *, as well as the European standard UNE-EN 15 886, 2011. Luminosity (L *), colour from red to green coordinate is calculated (a *), coordinate colour from blue to yellow (b *) yellow index (YI *), white index (WI *) and overall colour change (AE *).

The overall colour change, $\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$, allows you to set a numerical comparative value between the colour variation in the samples due to the TS test.

The spectrophotometer used was a Minolta CM-700d / 600D with a CM-S100W COLOR DATA Software SpectraMagic NX. Once it has reached constant mass of 7 cubic samples of each granite, 10 measurements were made in each face colour, establishing the average of these 420 measures granite.

2.10 fractography

Both microscopic observation (PM-petrographic microscopy and fluorescence-FM) and the texture of the composition is essential to identify early evolution of microcracks generated by the TS test. A $30 \times 20 \pm 3$ mm thin section measuring 30 μm thick was sectioned from one specimen of the AL, CA, CO and ZA granites before TS testing. These thin sections have been cut into the parallel faces of the specimens in cycles 21 and 42 the TS test to ensure propagation of microcracks observation of the same family.

Sawing was performed at a low speed (120 rpm) and a low strain so as not to generate microcracks. All thin sections were impregnated with fluorescence and characterised under an Olympus BX 51 polarized light microscope (PM) fitted with DP 12-coupled (6 V/2.5 Å) Olympus digital micrography and Olympus DP-Soft software (version 3.2). Microcracks were characterised with the same equipment, as well as with the same set-up using an Olympus U-RF-T mercury lamp fluorescence microscope (FM).

Photomicrographs were performed to study the microcracks (Laubach, 1997; Åkesson et al., 2004; Gale et al., 2010). PM and FM micrograph mosaics were made from the thin sections to monitor microcrack development during the TS cycles.

Each mosaic was comprised of 40 micrographs from the same area, measuring approximately 4.5 cm². The cross-Nicols micrograph mosaics were used for mineral quantification, and the fluorescence mosaics were used to study microcracks.

The FM micromosaic was placed on the PM micromosaic and this merger has made a network (1 \times 2 cm) divided into squares 5 \times 5 mm (a total of 110 mm, linear). The sides of this network were drawn parallel to the two sides of the original TS-tested cubic specimen (Fig. 2).

The number of microcracks which intersect the sides of this network have been measured. Considering the microcracks that cut across quartz (Qz), potassium feldspar (K-Fsp), plagioclase (Pl) and biotite group minerals (Bt) and classified from microcracks intracrystalline, contained within crystal, intercrystalline, between the sides of the crystal, formed along the edges of a mineral, and trans-crystalline, and that impacted more than one crystal. The obtained values were divided by the total length of the lines making up the network (110 linear mm), calculating the number of microcracks per linear millimeter (Linear Crack Density -LCD).

The response of each mineral in the process of microcracking due to TS testing has been calculated taking into account the percentage occupied by minerals in each of the granites (Fig.1). That is, the number of microcracks of each mineral has been divided by the percentage occupying this mineral in each granite.

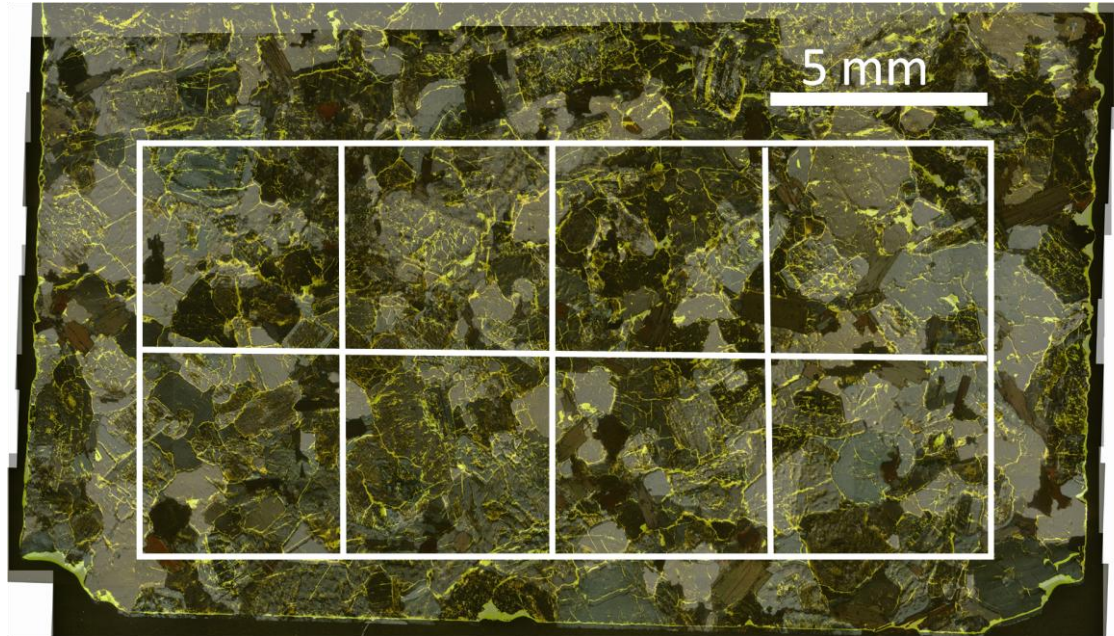


Fig. 2. Thin section of an Alpedrete granite specimen: an FM micrograph mosaic overlaid on a PM micrograph mosaic (two nicol), on the same area. Showing the rectangle (20×10 mm) that was divided into 5×5 mm squares.

3 RESULTS

3.1. Petrophysical properties

Heating and subsequent water cooling affected the bulk density (ρ_b) and effective porosity (P_e) of the granites studied, as the data in Table 1 show.

Initial ρ_b was similar in the four granites, ranging from $2\,602 \pm 16 \text{ kg/m}^3$ in CA to $2\,668 \pm 18 \text{ kg/m}^3$ in AL, and varied very little throughout the TS test. The steepest decline in ρ_b (0.3%) was recorded for ZA, whose post-TS test effective porosity was 1.78%.

At 0.71 %, the initial P_e was lower in CO than in ZA (1.72 %). The pre- and post-heating P_e varied only scantily, although the sharpest rise in this parameter was observed for CO (4.2 %).

Table 1. Effective porosity and bulk density of the four granites studied before and after 42 TS cycles.

Granite	Cycle 0		Cycle 42		Δ Bulk density (ρ_b) (%)	Δ Effective porosity (Pe) (%)
	Bulk density (ρ_b) (kg/m ³)	Effective porosity (Pe) (%)	Bulk density (ρ_b) (kg/m ³)	Effective porosity (Pe) (%)		
AL	2 668 \pm 18	0.83 \pm 0.1	2 668 \pm 5	0.84 \pm 0.1	0.0	1.2
CA	2 602 \pm 16	1.21 \pm 0.2	2 598 \pm 18	1.22 \pm 0.1	0.1	0.8
CO	2 629 \pm 13	0.71 \pm 0.1	2 627 \pm 3	0.74 \pm 0.1	0.1	4.2
ZA	2 657 \pm 15	1.72 \pm 0.1	2 649 \pm 3	1.78 \pm 0.1	0.3	3.5

AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite; Δ : variation.

The P-wave velocity measurements for the granites are given in Table 2. The highest initial V_p was found for CO (5 051 \pm 149 m/s), followed by AL (4 678 \pm 172 m/s), CA (3 694 \pm 151 m/s) and ZA (3 319 \pm 104 m/s). V_p declined after the TS cycles in all four varieties of granite. The post-42-cycle V_p decline differed in the four stones: 3.1% in CO, 6.0% in AL, 6.9% in CA and 7.1% in ZA.

The test findings confirmed that exposure to a temperature of 105 °C rapidly followed by water cooling altered the V_p readings (Table 2).

The data in Table 2 also showed that the highest initial V_s was found for AL (3 816 \pm 101 m/s), followed by CO (3 489 \pm 106 m/s), CA (2 590 \pm 108 m/s) and ZA (2 110 \pm 92 m/s). TS induced a decline in V_s in all four varieties of granite: by 2.3 % in ZA, 6.8 % in CO, 11.4 % in CA and 19.3 % in AL.

Table 2. Ultrasound wave velocity (V_p and V_s) in the four granites studied before and after 42 TS cycles.

Granite	Cycle	V_p (m/s)	$\Delta(\%)V_p$	V_s (m/s)	$\Delta(\%)V_s$
AL	0	4 678 \pm 172	-6.0	3 816 \pm 101	-19.3
	42	4 396 \pm 187		3 078 \pm 151	
CA	0	3 694 \pm 151	-6.9	2 590 \pm 108	-11.4
	42	3 439 \pm 130		2 294 \pm 110	
CO	0	5 051 \pm 149	-3.1	3 489 \pm 106	-6.8
	42	4 895 \pm 103		3 251 \pm 258	
ZA	0	3 319 \pm 104	-7.1	2 110 \pm 92	-2.3
	42	3 084 \pm 170		2 062 \pm 113	

AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite; Δ : variation.

E_{dyn} was initially highest in CO, followed by AL, CA and ZA (Table 3). E_{dyn} declined after the 42 TS cycles in all four varieties of granite, although at different rates: -6.2 % in CO, -9.5 % in AL, -10.2 % in ZA and -13.0 % in CA. CO had the highest and ZA the lowest post-test E_{dyn} s, with values of 62 293 and 24 686 MPa, respectively.

Table 3. Young's dynamic modulus of elasticity (E_{dyn}) for the four types of granites studied before and after the TS test.

Granite	E_{dyn} (MPa)			
	E_{dyn} Initial (MPa)	E_{dyn} Final (MPa)	Δ (%)	$E_{final}/E_{initial}$
AL	47 260	42 772	-9.5	0.91
CA	34 673	30 161	-13.0	0.87
CO	66 637	62 293	-6.2	0.94
ZA	27 488	24 686	-10.2	0.90

AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite; Δ : variation.

The granite with the highest initial MIP reading was ZA, with 1.4 %, followed by CA at 1.0 %, CO at 0.5 % and AL, which had the lowest initial MIP value, at 0.4 %. The MIP values rose in all the granites after 42 TS cycles.

Figure 3 shows the pore diameter distribution for the four granites in cycles 0 and 42 as determined by MIP. The cut-off between micro- and macroporosity was established at 5 μ m. Table 4 shows that AL granite had the lowest macroporosity (0.1 %), while the other three granites had values of under 0.3 %. The greatest initial microporosity was observed in ZA (1.1 %) and CA (0.7 %) followed by AL (0.3 %) and CO (0.2 %). Macroporosity rose by 200 % and microporosity by 33 % in AL after the TS test. Macroporosity also grew in CA, by 33 %, although the fraction with pore diameters between 100 and 400 μ m declined. This stone's microporosity rose by 57.1 %, specifically in the 1-5 μ m pore diameter interval.

The lowest rise in MIP values (20 %) was recorded for CO. Its macroporosity dipped from 0.3 to 0.2 %, while its microporosity rose by 50 %. ZA had the highest initial (1.4 %) and final (1.8 %) MIP values: its macroporosity rose from 0.3 to 0.7 %, while its microporosity was unaltered by the TS cycles.

Table 4. Mercury intrusion porosimetry (MIP)-based micro- and macroporosity for the four granites studied before and after the TS test.

Granite	MIP (%)			Macroporosity (%)			Microporosity (%)		
	Initial (%)	Final (%)	Δ (%)	Initial (%)	Final (%)	Δ (%)	Initial (%)	Final (%)	Δ (%)
AL	0.4	0.7	75.0	0.1	0.3	200	0.3	0.4	33.3
CA	1.0	1.5	50.0	0.3	0.4	33.3	0.7	1.1	57.1
CO	0.5	0.6	20.0	0.3	0.2	-33.3	0.2	0.3	50.0
ZA	1.4	1.8	28.6	0.3	0.7	133.3	1.1	1.1	0

AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite; Δ : variation.

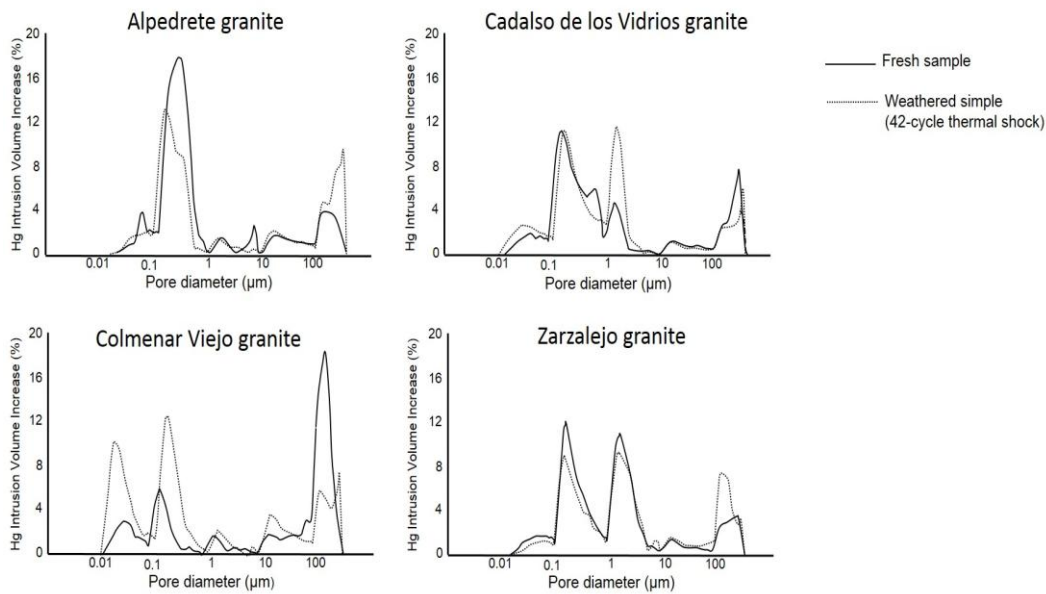


Fig. 3. Pore size distribution determined by MIP for four TS-tested granites.

Further to the pre- and post TS cycle colour measurements listed in Table 5, the four granites exhibited similar colour coordinates: medium-high L^* values (68.2-78.8) and a^* and b^* values of around 0. This quantification denoted the existence of lightly hued, matte colours, with greyish-white tones as a result of the presence of smoke grey Qz, grey-white K-Fsp, yellowish white Pl and very few micas. Slight colour changes were quantified after TS ageing. CO had the highest and Ca the lowest ΔE^* and the greatest rise in YI.

Table 5. Colour parameters before and after 42 TS test cycles.

Granite	L*		a*		b*		YI		WI		ΔE^*
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	
AL	68.2	70.4	-0.5	-0.6	1.0	0.1	1.7	-0.1	35.8	41.5	2.4
CA	78.8	77.6	-0.5	-0.5	2.3	2.2	4.0	3.8	46.1	44.7	1.2
CO	71.1	73.9	-0.4	-0.4	2.9	3.6	5.4	6.6	33.5	34.3	2.9
ZA	73.0	75.5	-0.3	-0.5	2.2	2.4	4.0	4.3	38.2	40.9	2.5

AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite; L*: lightness; a* red-green value; b*: blue-yellow value; WI: whiteness index; YI: yellowness index; $\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$: overall colour change.

The four granites exhibited high initial surface hardness, which declined slightly after the 42 TS cycles, more in ZA than in the other three materials and less in AL. The pre- and post-TS test hardness data are given in Table 6.

Table 6. Surface micro-hardness (L) before and after 42 TS cycles.

Granite	L		
	Initial	Final	Δ (%)
AL	861	843	-2.1
CA	869	843	-3.0
CO	871	848	-2.6
ZA	802	761	-5.1

AL: Alpedrete granite; CA: Cadalso de los Vidrios granite; CO: Colmenar Viejo granite; ZA: Zarzalejo granite; Δ : variation.

3.2 Fractography

The number of microcracks rose in all four granites after the TS test. The micrographs for all four stones after 0, 21 and 42 cycles are reproduced in Figure 4. Figure 5 shows the variations in granite linear crack density (LCD). CO had the smallest number of microcracks (LCD=0.7) at the outset and was the rock in which the smallest number was generated, LCD=1.3. While the largest number of pre-existing microcracks (LCD=1.4) was found for CA, this was the granite with the smallest post-test increase (Δ LCD=61 %). ZA ended the TS test with the largest number of microcracks, at LCD=2.5, for a 96 % increase.

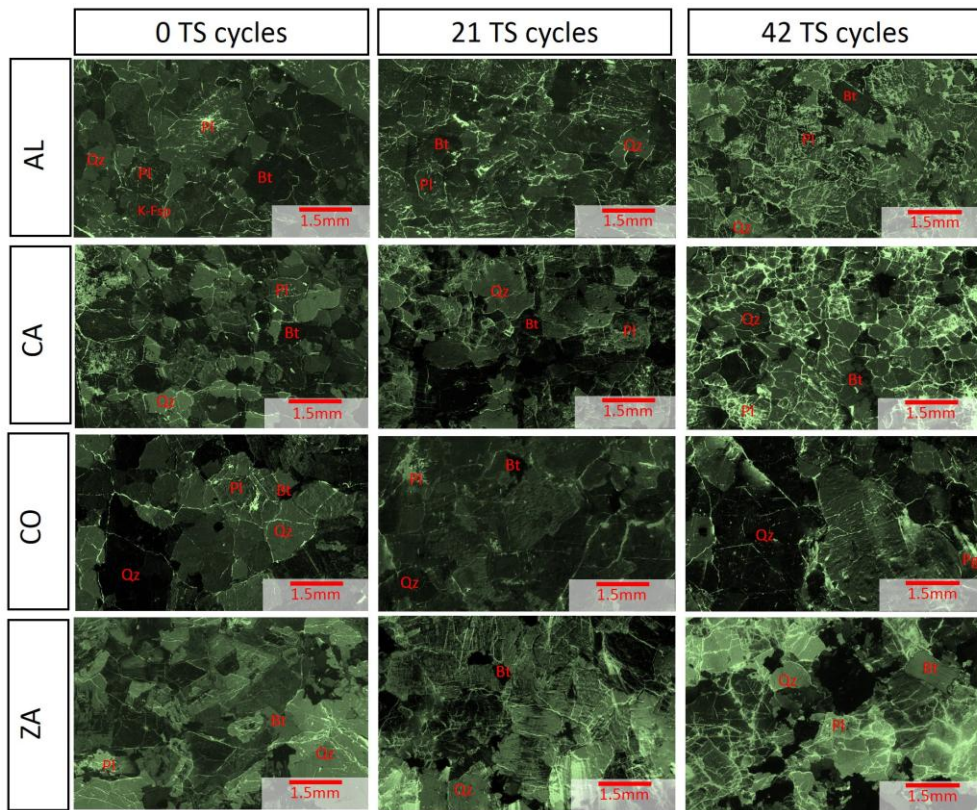


Fig. 4. Polarised petrographic (crossed nicols) micromosaics overlaid on fluorescence micrographs; from the top down: AL: Alpedrete granite, CA: Cadalso de los Vidrios granite, CO: Colmenar Viejo granite, ZA: Zarzalejo granite; left: before TS testing; centre after 21 TS cycles; right: after 42 TS cycles; Bt: biotite group minerals; K-Fsp: potassium feldspar; Qz: quartz, Pl: plagioclase.

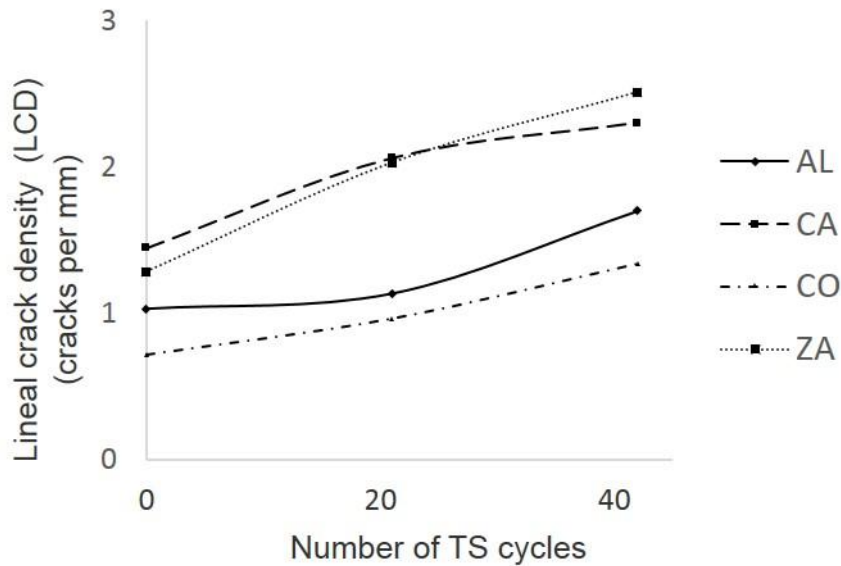


Fig. 5. Variation in linear crack density (LCD) during the TS test AL: Alpedrete granite, CA: Cadalso de los Vidrios granite, CO: Colmenar Viejo granite, ZA: Zarzalejo granite.

The data in Table 7 show the TS test-induced proliferation of inter- and intra-microcracks in the Qz, K-Fsp, Pl and Bt crystals in the granites studied.

In AL, K-Fsp was the mineral with the highest percentage of initial microcracks, followed by Qz, Pl and Bt. The steepest rise in TS microcracking was observed in K-Fsp, followed by Pl, Qz and Bt.

In CA, Qz was the mineral with the highest percentage of initial microcracks, followed by Pl, K-Fsp and Bt. TS raised microcracking in Bt, K-Fsp, Pl and Qz, in that order.

In CO, Qz was the mineral with the highest percentage of initial microcracks, followed by K-Fsp, Pl and Bt. The rise in microcracking due to TS affected the minerals in the following order: K-Fsp > Pl > Qz > Bt.

In ZA, Qz was the mineral with the highest percentage of initial microcracks, followed by Pl, K-Fsp and Bt. After TS, microcracking rose most steeply in Pl, followed by Bt, K-Fsp and Qz.

The four granites began the test with a larger number of inter- than intracrystalline microcracks. As the TS test progressed, more intracrystalline microcracks appeared and after 42 cycles, all the stones had more intra- than inter-crystalline microcracks. The highest inter- to intracrystalline microcrack ratio was observed in CA, followed by CO, ZA and AL. Granites CO and CA ended the test with a ratio of 1.6, and AL and ZA with 1.1.

Transcrystalline microcrack development was scant throughout the TS test. The LCD for transcrystalline microcracks varied for AL from 0.2 to 0.4, for CA from 0.4 to 0.4, for CO from 0.1 to 0.2 and for ZA from 0.1 to 0.2 microcracks per mm.

Table 7. Number of intra- and intercrystalline microcracks (MC) affecting quartz, potassium feldspar, plagioclase and biotite minerals (lineal length, 110 mm), by type of granite.

Granite	Before TS test							Cycle 21 TS test							After TS test							Δ (%)	Mineral	Granite							
	Mineral	MC	MC type	n° MC	MC type	n° MC	Inter/intra	Mineral	MC	MC type	n° MC	MC type	n° MC	Inter/intra	Mineral	MC	MC type	n° MC	MC type	n° MC	Inter/i ntra										
AL	Qz	162	Inter	102	inter-	365	1.9	Qz	169	Inter	107	inter-	520	1.7	Qz	207	Inter	133	inter-	631	1.1	27.4	Qz	AL							
		Intra	60	Intra					62	Intra	73																				
	K-Fsp	232	Inter	160				K-Fsp	392	Inter	256				intra-	299	K-Fsp	560					Inter		272	intra-	576	141.4	K-Fsp		
		Intra	72	Intra					136	Intra	288																				
	Pl	120	Inter	71	Pl	218		Inter	133	intra-	299	Pl	369		Inter	178	intra-	576	207.4	Pl											
Intra		49	Intra	84		Intra		191																							
Bt	40	Inter	32	Bt	40	Inter		24	intra-	299	Bt	72	Inter		48	intra-	576	80.0	Bt												
	Intra	8	Intra		16	Intra		24																							
CA	Qz	300	Inter	245	inter-	649		3.3	Qz	338	Inter	248	inter-		736	1.6	Qz	353	Inter	255	inter-	825	1.6	17.4	Qz	CA					
		Intra	55	Intra						90	Intra	98																			
	K-Fsp	208	Inter	165					K-Fsp	345	Inter	196					intra-	455	K-Fsp	384					Inter		220	intra-	511	84.9	K-Fsp
		Intra	43	Intra						149	Intra	165																			
	Pl	212	Inter	165	Pl	333			Inter	192	intra-	455	Pl		333		Inter	200	intra-	511	57.4	Pl									
Intra		47	Intra	141		Intra			149																						
Bt	125	Inter	75	Bt	175	Inter			100	intra-	455	Bt	250		Inter		150	intra-	511	100.0	Bt										
	Intra	50	Intra		75	Intra			100																						
CO	Qz	158	Inter	100	inter-	411	3.0		Qz	182	Inter	111	inter-	483	2.5		Qz	200	Inter	121	inter-	523	1.6	26.6	Qz	CO					
		Intra	58	Intra						71	Intra	79																			
	K-Fsp	90	Inter	63					K-Fsp	161	Inter	102					intra-	192	K-Fsp	227					Inter		125	intra-	318	152.2	K-Fsp
		Intra	27	Intra						59	Intra	102																			
	Pl	122	Inter	86	Pl	157			Inter	110	intra-	192	Pl	247			Inter	125	intra-	318	103.2	Pl									
Intra		35	Intra	47		Intra			122																						
Bt	46	Inter	31	Bt	46	Inter			31	intra-	192	Bt	46	Inter			31	intra-	318	0.0	Bt										
	Intra	15	Intra		15	Intra			15																						
ZA	Qz	314	Inter	217	inter-	572		2.5	Qz	411	Inter	240	inter-	645		1.2	Qz	457	Inter	246	inter-	696	1.1	45.5	Qz	ZA					
		Intra	97	Intra						171	Intra	211																			
	K-Fsp	189	Inter	131					K-Fsp	291	Inter	124					intra-	526	K-Fsp	313					Inter		153	intra-	640	65.4	K-Fsp
		Intra	58	Intra						167	Intra	160																			
	Pl	234	Inter	160	Pl	389			Inter	217	intra-	526	Pl	446			Inter	217	intra-	640	90.2	Pl									
Intra		74	Intra	171		Intra			229																						
Bt	64	Inter	64	Bt	80	Inter			64	intra-	526	Bt	120	Inter			80	intra-	640	87.5	Bt										
	Intra	0	Intra		16	Intra			40																						

4 Discussion

Granites exposed to heating cycles at temperatures of 30 to 80 °C (Gräf et al., 2013) exhibited significant decay. For one granite, Lin (2002) established a microcracking threshold temperature of 100 to 125 °C and observed that microcracks formed constantly between 200 and 573 °C.

The present findings for a temperature contrast of 20 to 105 °C showed that pre-existing microcracks coalesced and generated others as decay progressed. The effects of the TS test and hence the degree of decay varied in the granites studied.

The initial and final condition of the specimen, in particular its composition and texture, must be ascertained to understand thermal decay mechanisms in granite. The present analysis of the changes taking place in those two respects with different laboratory techniques provided insight into the evolution of decay in the four types of granite tested.

The study revealed the importance of mineralogy and texture in TS test-induced microcrack development. Mineral particle size and percentage content in rock affect microcrack

propagation (Seo et al., 2002). Thermal expansion is directly proportional to mineral size and also depends on crystal shape, orientation and anisotropy (Gómez-Heras et al., 2008; Vázquez et al., 2010, 2015). Decay is greater in granites with a coarse texture (Ollier, 1984; Warke et al., 1996) such as ZA, which, having larger size minerals than in the other three granites studied, exhibited the most intense microcracking.

The PM + FM micrographs of the mosaics were essential to quantifying both the pre-existing microcracks and the ones generated. Their analysis led to an understanding of the mechanisms generating decay, such as coalescence of pre-existing microcracks and the development of new unconnected intracrystalline microcracks inside Qz, K-Fsp, Pl and Bt crystals.

In Qz, intracrystalline microcracks propagated in the same directions as the ones pre-existing, which coalesced as further microcracks appeared in different directions due to the lack of cleavage or twinning in this mineral (Figure 6).

Both K-Fsp and Pl crystals exhibited two right-angled cleavage planes. Cleavage was perfect along plane (001) and good along plane (010). Microcrack inter- and intracrystalline propagation in feldspar (K-Fsp and Pl) is largely governed by its microtexture (Homand-Etienne and Troalen, 1984; Upadhyay, 2012) and respective planes of weakness: macles, cleavage, perthites or pre-existing microcracks.

Microcrack propagation in plagioclases is conditioned by their chemical composition and high degree of alteration. Compositional zoning in this mineral generates porosity in crystal interiors due to the high alterability of their nuclei (Catlos et al., 2011). That zone decayed during the TS test, generating microcracks that propagated from there to the rest of the crystal. Microcracks also commonly run parallel in the direction of the edges in perthitic textures.

In biotites the planes of basal cleavage split along axis *c* due to expansion and contraction (Figure 6), leading to concentrated stress and strain along the edges of the crystal (Vázquez et al., 2015) that affected the surrounding minerals.

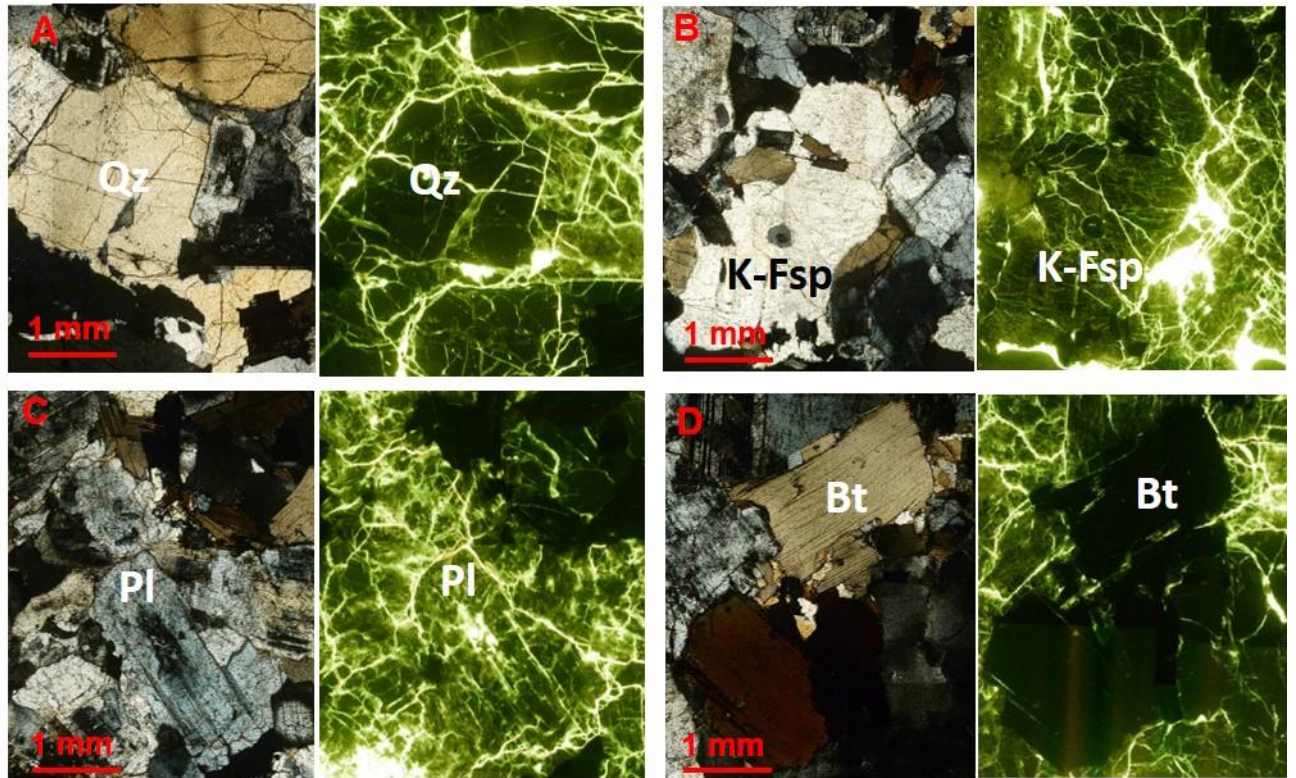


Fig. 6. Micrographs of Zarzalejo granite exposed to 42 TS cycles: left, PM (crossed nicols); right, FM; quartz (Qz), potassium feldspar (K-Fsp), plagioclases (Pl) and biotite-group minerals (Bt).

LCD, a technique also used by Wang et al. (1989), Sousa (2005), Ismael and Hassan (2008) and Vázquez et al. (2010), indicated that inter-, intra- and transcrystalline microcracking varied in the minerals in each granite. Nasser et al. (2007), studying the intra- to intercrystalline microcrack density ratio in granites exposed to different temperatures, but not to TS, reported a value of ~ 1.73 at 250 °C. In the present study (Table 7), the ratio depended largely on rock texture and mineralogy. CA, which had the smallest size minerals, had a higher ratio than ZA, whose minerals were larger. Since this ratio declined as the TS cycles progressed, microcracks developed more intensely inside the crystals.

The proportion of intercrystalline microcracks was especially high at the Qz-Qz, and Qz-K-Fsp and Qz-Pl boundaries, much lower between feldspars (K-Fsp-K-Fsp, Pl-Pl and Pl-K-Fsp) and even lower across the boundaries of the biotite-group minerals. As observed in other granites (Wang et al., 1989; Lin, 2002), this was due to the fact that the thermal expansion coefficient for

Qz is substantially higher than for K-Fsp and Pl (Skinner, 1966). Moreover, microcrack propagation depends on the orientation of each mineral's expansion axes. Adjacent crystals oriented along the expansion axis generate anisotropy as they expand in the same direction, creating higher pressure areas where more microcracks may arise. The more oriented its crystals, then, the more intense is granite decay with TS cycles.

The crystals in granites such as ZA (Freire-Lista et al., 2015c) are more oriented, this can be because ZA is quarried on the periphery of a pluton (Williams et al., 1958).

CO, with a larger crystal size than AL and more perthites and macles in its K-Fsp (Figure 4), exhibited a steeper rise in K-Fsp intracrystalline microcracking (271 versus 186 % in AL) which adopted the direction of the macles and perthites.

The TS test induced a small rise, on the order of hundredths of a percentage point, in Pe in the four granites due to the appearance of microcracks. The highest Pe was observed in ZA, the most intensely weathered of the granites studied, which also had the highest final MIP value, a finding consistent with results reported by Sousa (2014).

Ultrasound analysis (Chen et al., 2008; Inserra et al., 2013) detected microstructural change in the four granites. That change was related to the increase in LCD during TS-induced decay, as observed by Takarli and Prince-Agbodjan (2008).

The E_{dyn} of weathered building stone has been successfully calculated from V_p and V_s by Murphy et al. (1996), Svahn (2006), Brotóns et al. (2013) and Freire-Lista et al. (2015a), a procedure whose portability and non-destructivity constitute significant advantages. Table 3 gives the E_{dyn} values for each granite. The variation in their mechanical properties can be explained by the changes in their microstructure (Vasconcelos et al., 2007, 2009). The loss of E_{dyn} denotes structural alteration associated with a rise in weathering-induced microcracking. In the present study, E_{dyn} declined slightly but remained high in all the granites after the TS test. The decline recorded was similar to the value found with destructive techniques for other

granites heated to the same temperature (Dwivedi et al., 2008; Heuze, 1989 and Homand-Etienne and Houpert, 1989) obtained $E_{final}/E_{initial}$ values < 1 in granites exposed to temperatures of up to 200 °C (heating without TS). In the present study, $E_{final}/E_{initial}$ ratios ranging from 0.87 to 0.94 were found (in CA and CO, respectively), an indication that the test deployed here caused no severe internal damage, although E_{dyn} was affected by the slight proliferation of microcracking observed.

ZA, with the largest feldspars and largest number of initial microcracks (LCD), had low V_p and V_s values. It was also the granite with the lowest pre- and post-test E_{dyn} . CO exhibited the highest pre- and post-test E_{dyn} due to its lower LCD and Pe and higher pre- and post-test V_p than the other three granites. E_{dyn} was low in CA because of the large numbers of intercrystalline microcracks in this granite. Moreover, the microcrack proximity concomitant with a smaller crystal size would generate a lower E_{dyn} . While the relative decline in E_{dyn} was smallest in CA, it had the lowest $E_{final}/E_{initial}$ ratio, possibly as a result of the smaller increase in its LCD, for its $LCD_{final}/LCD_{initial}$ ratio was smaller than in the other three stones.

MIP revealed that the TS test induced a steeper rise in macroporosity than in microporosity in AL and ZA. Inasmuch as these granites have larger Pl crystals, TS prompted a proliferation of microcracks in their nuclei (Figure 4).

MIP values remained essentially unaltered in CO (from 0.5 to 0.6 %). Microporosity grew in this granite because decay increased the size of its microcracks, although not to above the 5- μ m macroporosity threshold. Its macroporosity in fact declined. The chemical alteration of plagioclases and potassium feldspars (Taboada and García, 1999) by the TS test favoured the formation of microparticles which could have been carried to the pores by any water present, reducing pore size.

Nonetheless, the decline in macroporosity observed may have been an instrumental artefact, for pores with diameters greater than 400 μ m would lie outside the range detectable by MIP (Figure

3). This granite, along with ZA, exhibited the steepest rise in effective porosity, however (Table 1).

The colour change in granite induced by TS can be measured (Vázquez, 2010; Iñigo et al., 2013). Colour parameters vary among granites due to their different mineralogical compositions. CA, a leucogranite, was found to have higher initial L^* and WI values due to its lower mica content. The ΔE^* values recorded revealed slight post-test variations in colour in all four granites that would have been extremely difficult to detect with the naked eye.

Parameter b^* rose most in CO, with a shift toward slightly more yellow tones, perhaps as an outcome of the alteration of its biotites and feldspars due to the early stage diffusion of thermally oxidised Fe^{2+} through the microcracks. That would have caused some dying and a rise in YI. As CA had more biotite-group minerals, it was the granite exhibiting the lowest ΔE^* .

The present surface micro-hardness findings, with pre-TS test L values of 802 and 871 for ZA and CO, respectively, were consistent with Verwaal and Mulder's (1993) observations for L (807) using an Equotip analyser for granite. ZA exhibited lower initial surface hardness due to its greater initial porosity, the larger size of its K-Fsp and Pl crystals and its more numerous intracrystalline Qz microcracks. Surface hardness declined more in ZA than in the other granites after the TS test due to its greater post-test LCD.

Aoki and Matsukura (2008) found a high correlation between L values and compressive strength. The present study corroborated the close relationship between E_{dyn} and L.

4 Conclusions

The use of polarising petrographic and fluorescence microscopic techniques to study the development of microcracks in four building granites lent insight into the variation of the petrophysical and mechanical parameters of these materials after 42 TS cycles (20-105 °C). The

technique also proved to be very useful for choosing granites apt for use as building materials in environments and climates characterised by thermal stress.

The declines in ρ_b , V_p , V_s , E_{sb} , L and the rises in Pe and MIP values observed in the granites denoted microcrack proliferation.

These variations in petrophysical properties differed depending on granite texture and mineralogy, which determined the rate of TS-induced decay, consisting in the coalescence of pre-existing and the generation of new, primarily intracrystalline, microcracks.

The proportion of intercrystalline microcracks was greater at the Qz-Qz, Qz-K-Fsp and Qz-Pl boundaries and much smaller at inter-feldspar boundaries.

Intracrystalline microcracking was more intense in K-Fsp and Pl and less so in Qz and Bt.

Qz exhibited mainly intragranular microcracks with irregular cracking patterns. In feldspars, the microcracks ran across altered areas, including macles, perthites and cleavage planes. Greater decay and concentrated microcracking were observed at the centre of highly calcareous zoned plagioclases. In K-Fsp, in turn, microcracking tended to develop in the direction of macles, cleavage planes or the edges of perthites. Microcracks propagate basically following the cleavage planes in biotite group minerals.

The ultrasound findings corroborated the existence of the microcracking detected with other techniques and determined granite durability. LCD rose with the number of TS cycles. All four granites had a high E_{dyn} before and after the 42 TS cycles (20-105 °C) and showed no significant colour change after TS testing.

Overall, these stones performed well under the TS test, with scant variation in their petrophysical properties, thanks primarily to their high initial ρ_b , V_p , V_s , E_{dyn} , L and low initial Pe , MIP and LCD values.

CA and CO were the most TS-cycle-resistant of the four granites studied. ZA was the lowest quality and lowest TS-resistant stone. It also had the highest LCD (1.7) and Pe (1.7 %) and the lowest V_p (3 319 m/s), surface hardness (802 L) and E_{dyn} (27 212 MPa). Inasmuch as it also

housed the largest size and highest content of K-Fsp particles, it should be used with caution as a building material in TS-prone environments.

The granites studied have resisted natural thermal stress for centuries in heritage buildings in regions with a continental Mediterranean climate.

The ability to predict (de novo or restoration) building granite behaviour in climates or sites characterised by temperature change will help choose the most suitable material and prevent the surface microcracking that favours the frequent appearance of surface crystal disintegration and detachment, as well as Façade scaling and flaking.

Acknowledgments

This study was funded by the Community of Madrid under the GEOMATERIALS-2CM Program (S2013/MIT-2914). The authors are members of the Complutense University of Madrid's Research Group: "Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio" (ref. 921349). The authors wish to thank the Geological and Mining Institute of Spain for conducting the thermal shock tests. The petrophysical assessments were run at the IGEO Petrophysical Laboratory, affiliated with the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM) Heritage Laboratory Network (RedLabPat). The assistance, input and support provided by laboratory technicians Pedro Lozano, Marian Barajas and Carmen Valdehita are gratefully acknowledged. Manuscript edited by Margaret Clark, professional translator and English language science editor.

Referencias

- Alm O, Jaktlund L.L and Kou, S. 1985. The influence of microcrack density on the elastic and fracture mechanical properties of Stripa granite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 40(3), 161–179.
- Åkesson, U., Hansson, J., Stigha, J. 2004. Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Engineering Geology*. 72, 131–142.
- Anders, M.H, Laubach, S.E., Scholz, C.H., 2014. Microfractures: A review. *Journal of Structural Geology*. 69, 377–394.

Akesson, U., Stigh, J., Lindqvist, J.E. and Göransson, M., 2003. The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. *Engineering Geology*. 68, 275–88.

Aoki, H. and Matsukura, Y., 2007. A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32, 1759–1769.

Aoki H. and Matsukura Y. 2008. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 67(1), 23–29.

Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Jáuregui, P., Rodríguez, M.A. and García del Cura, M.A., 2006. Assessment of the strength of building rocks using signal processing procedures. *Construction and Building Materials*. 20, 562–568.

Brotóns Torres, V., Tomás Jover, R., Ivorra, S. and Alarcón J.C., 2013. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology*. 167, 117–127.

Brotóns Torres, V., Tomás Jover, R., Ivorra, S. and Grediaga, A., 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73, 791–799.

Çatlos E., Baker C., Sorensen S., Jacob L. and Çemen I., 2011. Linking microcracks and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: Evidence from the Salihli and Turgutlu plutons in western Turkey (Menderes Massif). *Journal of Structural Geology*. 33, 951–969.

Chaki, S., Takarli, M. and Agbodjan, W.P., 2008. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. *Construction and Building Materials*. 22, 1456–1461.

Chen, Y., Kobayashi, T., Kuriki, Y., Kusuda, H. and Mabuchi M. 2008. Observation of microstructures in granite samples subjected to one cycle of heating and cooling. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*. 49(4), 217–26.

Christaras, B., Auger, F. and Mosse, E., 1994. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures*. 27, 222–228.

Darracott, B.W. and Orr, C.M., 1976. Geophysics and rock engineering. *Symp. On Exploration for Rock Engineering*. Johannesburg. 1, 159–164. Cape Town/Rotterdam: Balkema.

Demirdag S., 2013. Effects of freezing–thawing and thermal shock cycles on physical and mechanical properties of filled and unfilled travertine. *Construction and Building Materials*. 47, 1395–1401.

De la Torre, R., Sancho, L., Horneck, G., de los Ríos, A., Wierzchos, J., Olsson-Francis, K., Cockell, C., Rettberg, P., Berger, T., De Vera, J.P., Ott, S., Martínez-Frías, J., González-Melendi, P., Mercedes-Lucas, M., Reina, M., Pintado, A., Demets, R., 2010. Survival of lichens and bacteria exposed to outer space conditions – Results of the Lithopanspermia experiments. *Icarus*. 208, 735–748.

- De Vicente, G., Vegas, R., Muñoz Martín, A., Silva, P.G., Andriessen, P., Cloetingh, S., González Casado, J.M., Van Wees, J.D., Álvarez, J., Carbó, A. and Olaiz, A., 2007. Cenozoic thick-skinned deformation and topography evolution of the Spanish Central System. *Global and Planetary Change*. 58, 335–381.
- Dwivedi. R.D., Goel, R.K., Prasad, V.V.R., Amalendu Sinha, 2008. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 45, 303–315.
- Erguler, Z.A. and Shakoor. A., 2009. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. *Engineering Geology*. 108, 36–42.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E., Varas, M.J., 2010. Monzogranitic batholiths as a supplying source for the heritage construction in the northwest of Madrid. *Engineering Geology*. 115, 149–157. doi:10.1016/j.enggeo.2009.09.001.
- Fort, R., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M. and Freire, D.M., 2011. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. *Journal of Geophysics and Engineering*. 8, 132–144.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E., Gómez-Heras, M., Varas, M.J. and Freire, D.M., 2013. Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 46 (4), 421–429.
- Franzoni, E., Sassonia, E., Scherer, G.W., Naidu, S., 2013. Artificial weathering of stone by heating. *Journal of Cultural Heritage*. 14, 85–93.
- Fredrich J.T. and Wong T.F., 1986. Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. *Journal of Geophysical Research*. 91, 743–64.
- Freire-Lista, D., Fort, R., Varas-Muriel, M.J. 2015a. Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology* 113, 40–51. Doi: 10.1016/j.coldregions.2015.01.008.
- Freire-Lista, D., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015b. Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation. *Episodes*. 38 (2), 1–8.
- Freire-Lista, D.M., Gomez-Villalba, L.S., Fort, R., 2015c. Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes. *Periodico di mineralogia*. 84, 83–95.
- Gale, J., Landerb, R., Reeda, R., Laubach, S., 2010. Modeling fracture porosity evolution in dolostone. *Journal of Structural Geology*. 32, 1201–1211.
- García-del-Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A. and Martínez-Martínez, J., 2008. The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers. *Materiales de Construcción*. 58, 289-290, 65-79, ISSN: 0465-2746 eISSN: 1988–3226.
- Gokceoglu, C., Zorlu, K., Ceryan, S. and Nefeslioglu, H.A., 2009. A comparative study on indirect determination of degree of weathering of granites from some physical and strength parameters by two soft computing techniques. *Materials Characterization*. 60, 1317–1327.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J. and Fort, R., 2006. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: implications for granular disintegration of granites through thermal fatigue. *Geomorphology*. 78, 236–249.

- Gómez-Heras, M., Smith, B.J. and Fort, R., 2008. Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty. *Environmental Geology*. 56, 547–560.
- Gómez-Heras, M., Stephen, M., Smith, B.J. and Fort, R., 2009. Impacts of Fire on Stone-Built Heritage. An Overview. *Architectural Conservation*. 2, 15, 47–58.
- Gräf, V., Jamek, M., Rohatsch, A. and Tschegg, E., 2013. Effects of thermal-heating cycle treatment on thermal expansion behavior of different building stones. *Rock Mechanics & Mining Sciences*. 64, 228–235.
- Hale, P.A. and Shakoor, A., 2003. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. *Environmental and Engineering Geoscience*. 9, 117–130.
- Hall, K., 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*. 31, 47–63.
- Hall, K. and Thorn, E., 2014. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: An attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*. 206, 1–13.
- Halsey, D. P. Mitchell, D. J. and Dews, S. J., 1998. Influence of climatically induced cycles in physical weathering *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 31, 359–367.
- Harmuth, H., Rieder, K., Krobath, M., Tschegg, E., 1996. Investigation of nonlinear fracture behaviour of ordinary ceramic refractory materials. *Materials Science and Engineering*. 214, 53–61.
- Heuze, F.E., 1983. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks—a review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 20, 3–10.
- Homand-Etienne, F., Troalen, J.P., 1984. Behaviour of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes. *Engineering Geology*. 20 (3), 219–233.
- Homand-Etienne H, Houpert R., 1989. Thermally induced micro-cracking in granites: characterization and analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Abstr. 26, 125–34.
- Inserra, C., Biwa, S. and Chen, Y., 2013. Influence of thermal damage on linear and nonlinear acoustic properties of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 62, 96–104.
- Iñigo, A.C., Vicente, M.A., Rives, V., 2000. Weathering and decay of granitic rocks: its relation to their pore network. *Mechanics of Materials*. 32, 555–560.
- Iñigo, A.C., García-Talegón, J., Vicente-Tavera, S., Martín-González, S., Casado-Marín, S., Vargas-Muñoz, M., Pérez-Rodríguez, J.L., 2013. Colour and ultrasound propagation speed changes by different ageing of freezing/thawing and cooling/heating in granitic materials. *Cold Regions Science and Technology*. 85, 71–78.
- Ismael, I. S. and Hassan, M.S., 2008. Characterization of some Egyptian serpentinites used as ornamental stones. *Chinese Journal of Geochemistry*. 27, 140–149.

- Kern, H., Liu, B. and Popp, T., 1997. Relationship between anisotropy of P and S wave velocities and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite. *Journal of Geophysical Research*. 102, 3051–65.
- Kranz, R.T., 1983. Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*. 100, 449–480.
- Kawasaki, S., Tanimoto, C., Koizumi, K., Ishikawa, M., 2002. An attempt to estimate mechanical properties of rocks using the Equotip Hardness tester. *Journal of Japan Society of Engineering Geology*. 43, 244–248.
- Kawasaki, S., Kaneko, K., 2004. Estimation method for weathering thickness of man-made weathering rocks by using the Equotip hardness Tester. *Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquy, Salzburg* 491–494.
- Laubach S.E., 1997. A Method to Detect Natural Fracture Strike in Sandstones. *AAPG Bulletin*. 81 (4), 604–623.
- Lin, W., Takahashi, M. and Sugita, N., 1995. Change of microcrack widths induced by temperature increase in Inada granite. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*. 36, 300–304.
- Lin, W., 2002. Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite. *Journal of geophysical research*. 107(B10), 1–16.
- Lion, M., Skoczylas, F. and Ledésert, B., 2005. Effects of heating on the hydraulic and poroelastic properties of Bourgogne limestone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42, 508–520.
- Mambou, L.L.N., Ndop, J., Bienvenu, J.M., 2015. Modeling and numerical analysis of granite rock specimen under mechanical loading and fire. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 7(1), 101–108.
- Miskovsky, K., Taborda Duarte, M., Kou, S.Q. and Lindqvist, P.A., 2004. Influence of the mineralogical composition and textural properties on the quality of coarse aggregates. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 13, 144–50.
- Moses, C., Robinson, D. and Barlow, J., 2014. Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review. *Earth-Science Reviews*. 135, 141–161.
- Murphy, W., Smith, J.D. and Inkpen, R.J., 1996. Errors associated with determining P and S acoustic wave velocities for stone weathering studies. In: Smith, B.J., Warke, P.A. (Eds.), *Processes of Urban Stone Decay*, Donhead, London, pp. 228–244.
- Mutluturk, M., Altindag, R. and Türk, G., 2004. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41, 237–244.
- Nasseri, M.H.B., Schubnel, A. and Young R.P., 2007. Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 44, 601–616.
- Ollier, C.D., 1984. *Weathering. Geomorphology Texts*, vol. 2. Longman, London. 270 pp.

- Ozcelik, Y., Careddu, N. and Yilmazkaya, E., 2012. The effects of freeze–thaw cycles on the gloss values of polished stone surfaces. *Cold Regions Science and Technology*. 82, 49–55.
- Pires, V, Rosa LG and Dionísio, A., 2014. Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel–hole anchoring systems. *Construction and Building Materials*. 201 (64), 440–450.
- Raisanen M., 2004. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-Iitti complex, southeastern Finland. *Engineering Geology*. 74, 197–211.
- Reuschlé, T, Haore, S.G, Darot, M., 2006. The effect of heating on the microstructural evolution of La Peyratte granite deduced from acoustic velocity measurements. *Earth and Planetary Science Letters*. 243, 692–700.
- Rivas, T., Pozo, S., Fiorucci, M.P. López, A.J., Ramil, A., 2012. Nd: YVO4 laser removal of graffiti from granite. Influence of paint and rock properties on cleaning efficacy. *Applied Surface Science*. 263, 563–572.
- Russel, S.A., 1927. Stone preservation committee report (Appendix I). H.M. Stationary Office, London.
- Schiavonma, N. Chiavarib, G., Schiavonb, G. Fabbri, D., 1995. Nature and decay effects of urban soiling on granitic building stones. *The Science of the Total Environment*. 167, 87–101.
- Schubnel, A., Benson, P.M., Thompson, B.D., Hazzard, J.F. and Young, R.P., 2006. Quantifying damage, saturation and anisotropy in cracked rocks by inverting elastic wave velocities. *Pure and Applied Geophysics*. 163, 947–73.
- Seo, Y.S., Jeong, G.C., Kim, J.S., Ichikawa, Y., 2002. Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. *Engineering Geology*. 63, 259–275.
- Shao, S. and Wasantha, P.L.P., Ranjith, P.G. and Chen, B.K., 2014. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 70, 381–387.
- Simmons, G. and Cooper, H.W., 1978. Thermal cycle cracks in three igneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech Abstract*. 15, 145–8.
- Skinner, B.J., 1966. Thermal expansion. In *Handbook of physical constants*. Geological Society of America Memoirs. 97, 75–96.
- Smith, B.J., Srinivasan, S., Gómez-Heras, M., Basheer, P.A.M. and Viles, H.A., 2011. Near-surface temperature cycling of stone and its implications for scales of surface deterioration. *Geomorphology*. 130, 76–82.
- Sousa, L.M.O., Suarez del Rio, L.M., Calleja, L., Ruiz de Argondona, V.G. and Rey, A.R., 2005. Influence of microcracks and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*. 77, 153–168.
- Sousa, L.M.O., 2014. Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73, 569–588.

Svahn, H., 2006. Non-Destructive field Tests in Stone Conservation: Literature Study. Rapport från Riksantikvarieämbetet, Stockholm. 63 pp.

Taboada, T., García, C., 1999. Pseudomorphic transformation of plagioclases during the weathering of granitic rocks in Galicia NW Spain. *Catena*. 35, 291–302.

Takarli, M., Prince, W. and Siddique, R., 2008. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 45, 1164–1175.

Takarli, M. and Prince-Agbodjan, W., 2008. Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage. *Journal of ASTM international*. 5 (3), 1–13.

TS EN 14066, Natural stone test methods-determination of resistance to ageing by thermal shock. Institute of Turkish Standards (Türk Standartları Enstitüsü, TSE), p. 3.

Tuğrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*. 75, 215–227.

UNE-EN 14 066, 2003. Natural stone test methods - Determination of resistance to ageing by thermal shock.

UNE-EN 14 579, 2005. Natural Stone Test Methods - Determination of Sound Speed Propagation.

UNE-EN 1 936, 2007. Natural Stone Test Methods - Determination of Real Density and Apparent Density and of Total and Open Porosity.

UNE-EN 15 886, 2011. Conservation of cultural property - Test methods - Colour measurement of surfaces.

Upadhyay, D., 2012. Alteration of plagioclase to nepheline in the Khariar alkaline complex, SE India: Constraints on metasomatic replacement reaction mechanisms. *Lithos*. 155, 19–29.

Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.S.A. and Pamplona, J., 2007. Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt Hammer hardness. *Proc. 10th North American Masonary Conference*, St. Louis, Missouri. 980–991.

Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S. and Pamplona, J. 2009. Compressive Behavior of Granite: Experimental Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 21(9), 502–511.

Vázquez, P., 2010. Granitos ornamentales: caracterización, durabilidad y sugerencias de uso. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. 314 pp.

Vázquez, P., Alonso, F.J. Esbert, R.M. and Ordaz, J., 2010. Ornamental granites: Relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network. *Construction and Building Materials*. 24, 2536–2541.

Vázquez, P., Shushakova, V., Gómez-Heras, M., 2015. Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: Experimental observations and stress simulation. *Engineering Geology*. 189, 58–67.

- Verwaal, W. and Mulder, A., 1993. Estimating rock strength with the Equotip hardness tester. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 30, 659–662.
- Viles, H., Goudie, A., Grab, S. and Lalley, J., 2011. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*. 36, 320–333.
- Villaseca, C., Orejana, D. and Belousova, E.A., 2012, Recycled metagneous crustal sources for S- and I-type Variscan granitoids from the Spanish Central System batholith: Constraints from Hf isotope zircon composition. *Lithos*. 153, 84–93.
- Warke, P. A., Smith, B. J. and Magee, R. W., 1996. Thermal response characteristics of stone: implications for weathering of soiled surfaces in urban environments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 21, 295–306.
- Wang, H. F., Bonner, B. P, Carlson, S. R., Kowallis, B. J. and Heard, H. C. 1989. Thermal stress cracking in granite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 94, 1745–1758.
- Wanne, T.S. and Young, R.P., 2008. Bonded-particle modeling of thermally fractured granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 45, 789–799.
- Williams H., Turner F., Gilbert Ch. (1958) - An introduction to the study of rocks in thin sections. W.H. Freeman and company. 406pp.
- Yavuz, H., 2011. Effect of freeze–thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 70, 187–92.

6.5 Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes.

Periodico di Mineralogia, 82 (in press).

Freire-Lista, D.M., Gomez-Villalba, L.S. y Fort, R.

Una vez conocida la evolución de las microfisuras generadas en los granitos debido a los ciclos envejecimientos efectuados, se planteó la necesidad de conocer más pormenorizadamente esa evolución en los feldespatos que los componen, al ser estos los minerales que mayor deterioro han sufrido, y debido a que son los más susceptibles a sufrir alteración química de forma natural. Se caracterizó el deterioro inducido por la meteorización física en la microestructura de los cristales de feldespato potásico y plagioclasa debido a choque térmico y ciclos de hielo/deshielo. El estudio de las microfisuras que se producen en el contacto y en interior de estos minerales permitió determinar la influencia de la meteorización química sobre los mismos.

El deterioro físico originado por contrastes térmicos y formación de hielo ha propagado microfisuras en los feldespatos siguiendo en muchas ocasiones planos de debilidad microestructural.

La microfisuración de los feldespatos genera pérdida de cristales en la superficie y permite que otros procesos químicos de alteración favorezcan su deterioro.

El ensayo de choque térmico ha producido mayor deterioro en los granitos que la acción de hielo deshielo. El granito más afectado por la generación de microcracks en los feldespatos ha sido Zarzalejo.

MICROCRACKING OF GRANITE FELDSPAR DURING THERMAL ARTIFICIAL PROCESSES

D.M. Freire-Lista ^(1,2), L.S Gomez-Villalba⁽¹⁾, R. Fort ^(1,2)

(1) Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC, Complutense University of Madrid UCM. Madrid, Spain (d.freire@igeo.ucm-csic.es, luzgomez@geo.ucm.es, rafort@csic.es)

(2) CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid, Spain

Abstract

Granite is one of the most widely used building stone and is a main component in many heritage buildings for its austere appearance and its availability as a stone of the Earth's crust. When exposed at the Earth's surface, thermal changes are responsible for its decay, especially in granites exposed to weathering. Feldspars, an important component of granite mineralogy, are among the most likely crystalline phases susceptible to microcracking, which, in turn, causes the disintegration of crystals lattices. Microcracks generated in granite feldspars during thermal processes such as freeze-thaw and thermal shock cycles, carried out in the laboratory, were studied to understand the decay process of granite buildings. The aim of this study is to determine microcrack propagation (both as inter- and intra-crystalline microcracks types) within feldspars (potassium feldspars and plagioclases) of two building granites located near the city of Madrid (Spain). Potassium feldspars and plagioclases developed different mechanisms of microcracking, probably, due to their microstructures and/or driven, preferentially, by crystallographic anisotropies such as twinning and zoning of the precursor mineral, and neoformation of secondary mineral phases at the expense of a primary mineral phase.

By combining petrographic analysis of the studied granite stones, with physical laboratory tests (thermal shock and freeze-thaw tests), we outlined the evolution of microcracking in order to identify the potential problems that disintegration may cause to stone monuments and buildings.

Keywords: *physical disintegration, feldspars, thermal shock, freeze-thaw, building stone, decay, weathering.*

1 INTRODUCTION

Feldspar minerals are abundant in most of the building stone used since the oldest Egyptian monuments. Granite is used as a building stone in façades, walls, dados of buildings, bases of large structures, statues, fountains, milestones and paving worldwide (Vazquez et al., 2010; Pires, 2014) as well as Egyptian temples and obelisks, which remain among the largest stone monuments in history (e.g., Iversen, 1992). This building stone may be subject to temperature changes that produce decay (Gomez-Heras et al., 2006, 2008, 2009; Sousa, 2014) outlined the factors affecting durability of building granite stone, they depend mostly on extrinsic factors such as environmental, (e.g. temperature changes) and intrinsic conditions such as mineralogy, pre-existing microcracks and microstructure (Schouenborg, 1996; Reuschlé et al 2003, 2006) defined by compositional zoning, twins, dislocations, deformation bands or cleavage, among others. Feldspars, potassium feldspars (K-Fsp) and plagioclases (Pl) have easier microcrack propagation by their two perfect cleavage systems (Tullis and Yund, 1985, 1987, 1992; Hadizadeh and Tullis, 1992). Microcracks produced by freezing water (Ingham, 2005; Takarli, et al., 2008; Freire-Lista et al., 2015a) are due to the combination of several mechanisms including the volumetric expansion of water during freezing (Ozcelik et al., 2012), hydraulic pressure (Hor and Morihiro, 1998), and ice segregation (Walder and Hallet, 1985; Akagawa and Fukuda, 1991; Hallet et al., 1991; Matsuoka and Murton, 2008). The microcracks caused by thermal shock are due to volumetric expansion of the stone minerals (Lin, 1995, 2002; Franzoni et al., 2013; Hall and Thorn, 2014; Vázquez et al., 2015). Therefore, the thermal expansion coefficient of each mineral will define the thermal decay and anisotropies within each crystal. At temperatures below 400° C, the plagioclase has a higher thermal expansion coefficient than K-feldspar (Skinner, 1966).

Propagation of microcracks (Kranz, 1983; Åkesson et al., 2004; Malaga-Starzec et al., 2006; Anders et al, 2014) in granite stone (Íñigo et al., 2000, 2013; Tan et al., 2011) due to thermal changes (Chen et al., 2008; Bayram, 2012; Inserra et al., 2013; Jamshidi et al., 2013) is an

aspect that should be taken into account when assessing decay of granites used as building stone (Garcia-del-Cura et al., 2008).

The aim of this work is to characterize the decay induced by physical weathering in the K-feldspars and plagioclases crystal microstructures due to thermal changes (freeze-thaw and thermal shock). Microcrack propagation, in turn, promotes chemical weathering of building stone and of natural plutonic felsic source rock (e.g., Le Pera and Sorriso-Valvo, 2000; Wilson, 2004; Scarciglia et al., 2005; Caracciolo et al., 2012; Scarciglia et al., 2012), feldspars (Page and Wenk, 1979; Eggleton and Buseck, 1980).

There are few studies on physical weathering processes caused by thermal fluctuations that affect K-feldspar and plagioclase microstructures, and in this regard, our study will help in understanding the granite stone microfabric in equivalent environmental conditions.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Rock samples

The behavior of two granites used in the building heritage in Spain, Alpedrete granite (hereinafter AL) and Zarzalejo granite (hereinafter ZA) has been investigated.

Both stones are extracted from quarries located in plutons belonging to the Guadarrama Batolite, in the southwest of the Sierra de Guadarrama, in the eastern part of the Spanish Central System (Villaseca et al, 1998; Villaseca and Herreros, 2000) Granites are formed by plutonic complex intrusion (Brandebourger, 1984) during the Carboniferous-Lower Permian. Granites correspond to an acid magmatism, average composition “monzogranite” late to post-orogenic and belong to the province of *Piedra Berroqueña* (Fort et al., 2011; Freire-Lista and Fort, 2015) with a continental Mediterranean climate and with a medium precipitation value of 384 mm/year.

The Alpedrete pluton (350 km²) has many historical quarries near to its core and is located approximately 45 km north of the city of Madrid (Fort et al., 2010). Alpedrete granite is an equigranular, medium- to fine-grained monzogranite (Freire-Lista et al., 2015a)

The blocks, from which samples have been cut, were taken from an historic granite quarry, located in Alpedrete village (40 ° 39 '45.7 "N 4 ° 00' 47.7" W) (Figure 1). This granite has been widely used as building stone for important heritage buildings, for example the Royal Palace (1735–1764) in Madrid (Fort et al., 2013). Alpedrete granite has been nominated as a Global Heritage Stone Resource due to its heritage importance (Freire-Lista et al., 2015b).

The Zarzalejo pluton is located about 60 km northwest of the city of Madrid. Two types of granites can be differentiated by their texture: a porphyritic texture characterized by the occurrence of K-feldspar megacrystals with medium-grained crystals and an equigranular granite (López-Arce et al., 2010). In this work, an equigranular with medium to coarse crystal size was tested. This granite has been widely used, e.g. Royal Monastery at El Escorial (1563–1584). Samples were taken from an historic granite quarry (40 ° 32 '15.97 "N 4 ° 10' 26.89" located within the margins of the Zarzalejo pluton (figure 1).

The tectonic history of the two granites is similar and both granites are slightly deformed. The petrophysical properties of Alpedrete and Zarzalejo granites are presented in Table 1.

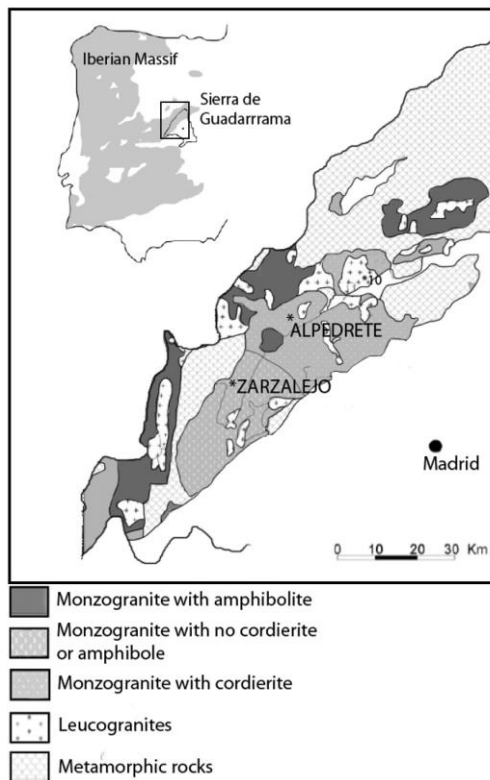


Figure 1. Location map of Alpedrete and Zarzalejo granites. After Fort et al., 2013.

Table 1. Relationship of physical properties for AL: Alpedrete granite and ZA: Zarzalejo granite. (1) Bernabeu et al., 2004, (2) Mendiña and Fort, 2005, (3) Fort et al., 2011, (4) Fort et al., 2013, (5) Freire-Lista et al., 2015a.

PROPERTY	ALPEDRETE GRANITE	ZARZALEJO GRANITE
Impact strength (cm)	$68 \pm 14^{(2)}$	$58.8^{(1)}$
Compression strength (Mpa)	$136.9 \pm 41^{(2)}$	$160.0 \pm 49.0^{(1)}$
Flexural strength (Mpa)	$8.88 \pm 3.69^{(2)}$	$8.21 \pm 2.25^{(1)}$
Bulk density (Kg/m^3)	$2636 \pm 10^{(5)}$	$2657 \pm 15^{(5)}$
Young's Modulus (MPa)	$33275^{(5)}$	$26882^{(5)}$
Water absorption (%)	$0.3 \pm 0.0^{(3)}$	$0.6 \pm 0.0^{(3)}$

Water saturation (%)	$0.5 \pm 0.2^{(1)}$	$1.24^{(1)}$
Capillary absorption coefficients ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$)	$1.523 - 3.1983^{(3)}$	$4.238 - 4.796^{(3)}$
Porosity accesible to water (%)	$0.8 \pm 0.1^{(5)}$	$1.7 \pm 0.06^{(5)}$
Mercury intrusion porosity (%)	$0.44^{(5)}$	$1.4^{(5)}$
Frost resistance (%)	$0.01^{(2)}$	$0.005^{(1)}$
Ultrasonic P-wave velocity propagation (m/s)	$4625 \pm 163^{(5)}$	$3219 \pm 204^{(5)}$
Ultrasonic S-wave velocity propagation (m/s)	$3812 \pm 92^{(5)}$	$2\,2116 \pm 89^{(5)}$
Total anisotropy (%)	$5.8^{(4)}$	$12.7^{(4)}$

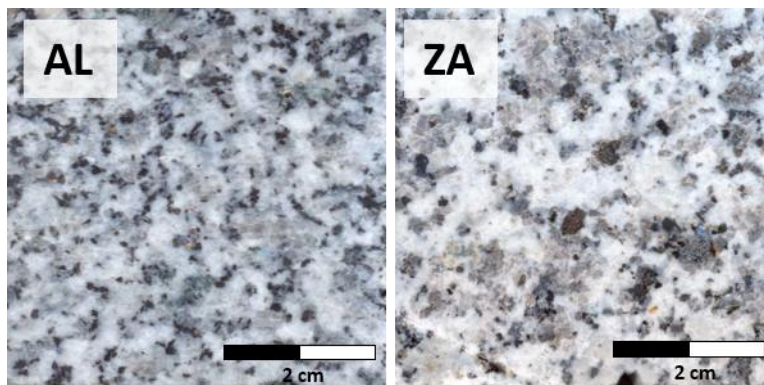


Figure 2. Hand samples. AL: Alpedrete granite, ZA: Zarzalejo granite.

2.2 Testing

2.2.1 Thermal shock test (TS test)

7 cubes corresponding to AL and ZA granite samples ($5 \times 5 \times 5 \pm 0.5$ cm) were used for performed 42 test cycles according to European standard EN 14066, 2003. First, the samples were put in a ventilated oven at $105 \pm 5^\circ \text{C}$ for 18 h. Samples were taken from the oven and then

put into water at room temperature for 6 h. When TS cycle is up to the 42 cycles, the TS test ended.

2.2.2 Freeze-thaw test (FT test)

FT testing was conducted as specified in European standard EN 12371, 2001 (with 280 cycles). 7 cubes ($50 \times 50 \times 50 \pm 0.5$ mm) of Alpedrete and Zarzalejo granite samples were water-saturated at 20 °C and atmospheric pressure for 48 ± 2 h. The samples were subsequently placed in an air-filled FT test chamber (dry conditions), where they were spaced no less than 10 mm apart and at least 20 mm from the side of the chamber. The temperature sequence in each 12 h cycle was as follows: (i) the temperature was lowered from +20 to 8 °C in 2 h (dry conditions); (ii) and then to 12 °C in 4 h (dry conditions); (iii) the chamber was automatically filled with water in 0.5 h until the specimens were completely submerged at temperatures of 5 to 20 °C (wet conditions); (iv) the specimens remained submerged for 5 h; and (v) the water in the chamber was emptied in 0.5 h.

The FT chamber was fitted with a control system that allows programming the FT cycles to an accuracy of ± 1.0 °C.

2.2.3 X-Ray Diffraction

Representative samples from both granites, Alpedrete and Zarzalejo, were selected for X-Ray diffraction (XRD) analyses. With this technique, the mineralogical phases and the possible preferential orientations associated can be detected. The sample was ground manually and some quartz crystals were separated and removed to minimize its high reflectance power and a ground fraction <50 μ m was obtained. A Phillips PW-1710 Cu K α radiation powder diffractometer was used, and the scanning conditions were 2 θ angles of 2–68°, scan step size 0.02°, scanning rate 2°/min in continuous mode, and beam intensity of 40 kV and 30 mA. The software PCPDFWIN

was used for comparing the results with the referenced in the JCPDS database (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

2.2.4 Fractography

Thin sections of $30 \times 20 \pm 3$ mm with a thickness of 30 μm were made from the cuts of one specimen (Williams et al., 1958; Mills, 1991) of the Alpedrete and Zarzalejo granites before and after 280 FT test cycles and 42 TS test cycles.

These thin sections have been cut into the parallel faces of the specimens to ensure the propagation of microcracks observation of the same family. Sawing was performed at low speed (120 rpm) and low strain so as not to generate microcracks. The thin sections were stained with sodium cobaltonitrite to better discriminate K-feldspar from plagioclase.

All thin sections have been impregnated with fluorescein according to Sousa et al., 2005 and characterised under an Olympus BX 51 polarized light microscope (PM) fitted with DP 12-coupled (6 V/2.5 Å) Olympus digital micrography and Olympus DP-Soft software (version 3.2). Microcracks were characterised with the same equipment, as well as with the same set-up using an Olympus U-RF-T mercury lamp fluorescence microscope (FM).

The Michel-Lévy method was used to determine the composition of plagioclase in thin sections (Michel-Lévy, 1894).

Fluorescein is rapidly deteriorated when the thin section is also stained with sodium cobaltonitrite, so it is necessary to carry out the petrographic analysis immediately after staining.

Polarized light and fluorescence micrograph mosaics were made from the thin sections to study before and after the FT and TS tests microcracks. Each mosaic comprised about 40 micrographs, measuring approximately 4.5 cm² of each thin section. The cross-nicols

micrograph mosaics were used for mineral quantification and the fluorescence mosaics to study microcracks. Each fluorescence micrograph mosaics was laid over the same area of the polarized light crossed nicols micrograph mosaics and on the resulting micrograph mosaics was drawn a rectangle (1×2 cm) divided into 5×5 mm squares (A total of 110 mm, linear). The sides of this mesh were drawn parallel to the two sides of the original cubic specimens.

The volume of K-feldspar and plagioclase and number of microcracks which intersects the sides of this mesh has been measured, considering the microcracks that cut across K-feldspars and plagioclases. Intercrystalline and intracrystalline microcracks have been differentiated in each mineral phases.

3 RESULTS

3.1 X-Ray Diffraction (XRD) results

In Alpedrete granite (AL) sample the typical pattern of orthoclase (JCPDS = 75-1190) records the highest intensity peak as 220 (26.9°) and the second in intensity to 002 (27.5°).

In low signal, peaks can be assigned to sodic plagioclase (Pl, $a=8.1350\text{\AA}$ $b=12.7840\text{\AA}$ $c=7.1594\text{\AA}$ space group: C-1), microcline (Mc, $a=8.5714\text{\AA}$ $b=12.9645\text{\AA}$ $c=7.2203\text{\AA}$, space group: C-1), biotite (Bt, $a=5.357\text{\AA}$ $b=9.255\text{\AA}$ $c=20.23\text{\AA}$, space group: C 2/c) and quartz (Qz, $a=4.913\text{\AA}$, $c=5.405\text{\AA}$, space group: $P3_221$ or $P3_221$).

In Zarzalejo granite sample (ZA), the predominant phase is microcline (8.5714\AA $a=b=c=7.2203\text{\AA}$ 12.9645\AA , space group: C-1), although peaks with low intensity correspond to orthoclase (Or), sodium plagioclase (Pl), quartz (Qz) and biotite (Bt).

Figure 3 shows the results of XRD analyzes performed on a selection of feldspar occurring in both samples, Alpedrete and Zarzalejo granites.

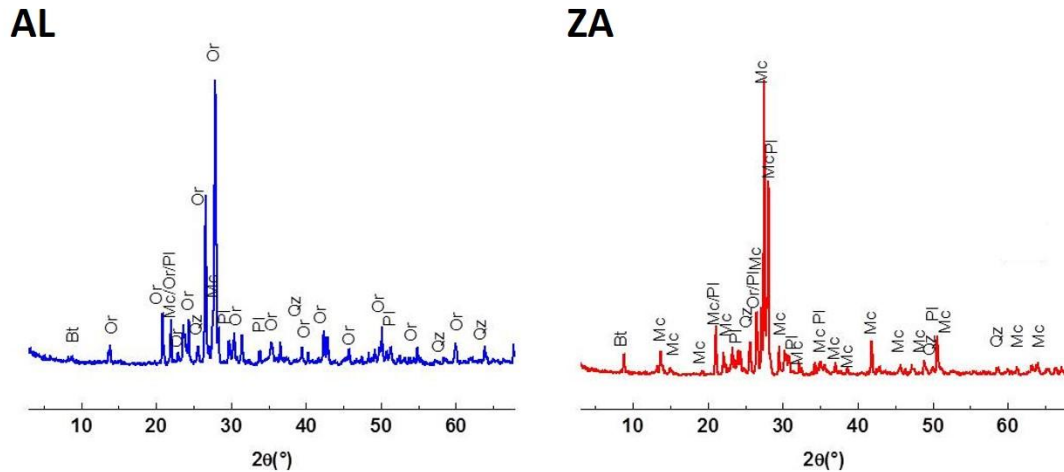


Figure 3. XRD patterns of Alpedrete (AL) and Zarzalejo (ZA) granites. Biotite (Bt), quartz (Qz), microcline (Mc), plagioclase (Pl), orthoclase (Or).

4 PETROGRAPHIC RESULTS

4.1 Alpedrete granite (AL) before thermal tests

AL granite has the texture of granite, holocrystalline, hypidiomorphic, granular with the typical plagioclase-quartz-potassium feldspar paragenesis (Figure 4) plagioclase is presented in oligoclase type subhedral crystals (An 28-30), being slightly alkaline at the edges (An 11-15). In general plagioclase develops albite-carlsbad twin (1-4 mm), zoning (0.1-3.5mm) and polysynthetic twins (1.8-4 mm). Quartz occupies irregular interspaces (1.5-3.5 mm). The feldspar is orthoclase (around 1.5-4.5 mm), usually kaolinized and with perthite textures. Perthite crystals (~0.3 mm wide) are arranged at the edges where the plagioclase becomes more alkaline. Laminar crystals of biotite (0.8-1.7 mm) are presented randomly distributed throughout the sample.

A detail of the texture in the fresh rock is shown in figures 4a and 4a'. In this case, locally perthites are aligned with twin planes; the fracturing affects such the orthoclase crystals which are arranged in an uneven pattern and the polysynthetic twins with displacement of 0.19 mm. Besides occasionally slightly bent polysynthetic twins are observed. In the center, sericitized plagioclase is aligned with biotite sheets showing typical zircon inclusions and dark halos

around the zircon (figure 5d). A detail in figure 5d shows albite lamellae present within microcline forming perthite textures, biotite richer in iron with inclusions of pleochroic halos around zircon.

Several generations of biotite have been identified in the fresh rock; the earlier in flakes, the following occupying cracks and veins, which generally produce alterations to iron oxide (figure 5c), and the later presented superimposed to the veins (figure 5a). Details of the microcracks of about 0.1 mm thickness occur and are filled with clay minerals are shown in figure 5a. These are arranged cutting the feldspars. The microcracking affects several feldspars, forming subparallel sinuous branches with separation of 0.25 mm. The veins are filled with phyllosilicates or iron oxides: these later are formed by weathering as precipitates along biotite cleavage planes and microcracks (figure 5c). Other biotite crystals (0.5-1.2 mm) are not aligned with microcracks which happened in a post-fracturing process (figure 5a). Throughout these microcracks are aligned twinning planes of euhedral plagioclase crystals. Inside them multiple microcracks are distributed at angles of 35° with the twin plane (figure 5c).

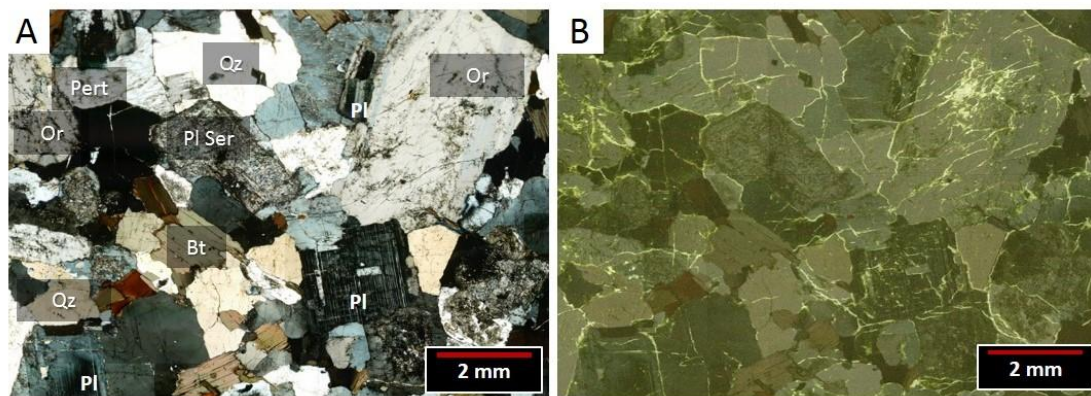


Figure 4. General aspect of the Alpedrete sample before the treatments showing the hypidiomorphic-granular texture. Biotite sheets (Bt), quartz (Qz), Orthoclase (Or), plagioclase (Pl), perthite (Pert) and sericite (Ser). A: Polarized light micrograph mosaic, crossed nicols. B: Fluorescence micrograph mosaic overlaid on polarized light micrograph mosaic.

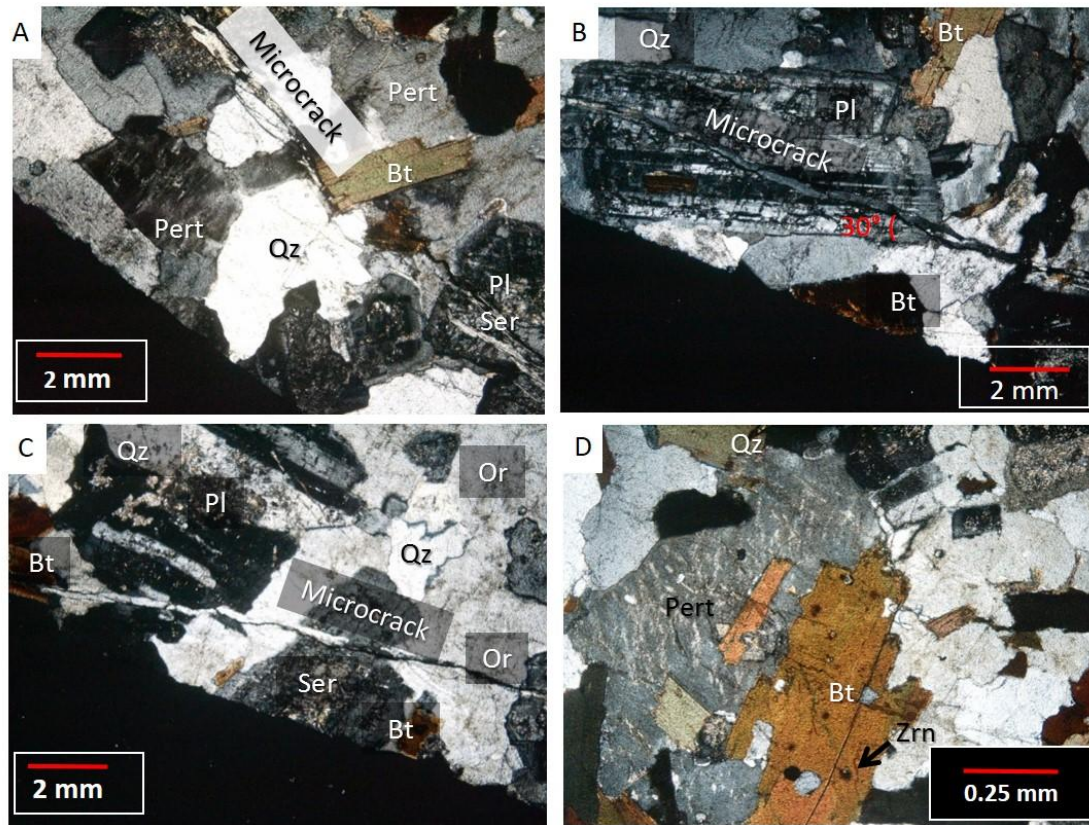


Figure 5. Polarized light micrograph of Alpedrete sample before the treatments, crossed nicols. Biotite (Bi) Orthoclase (Or), plagioclase (Pl), perthite (Pert), sericitized plagioclase (Ser) and quartz (Qz) affected by microcracking. A: A sheet of biotite is over the microcrack. B: Microcrack affecting a plagioclase with polysynthetic twinned. C: Microcracking with filling of phyllosilicates and iron oxides affecting the original texture. D: Detail showing perthites, biotite with zircon, quartz and K feldspar.

4.2 Zarzalejo sample (ZA) before thermal test

ZA sample before the thermal treatments, shows a typical holocrystalline hypidiomorphic granular texture (figure 6). It consists mainly of intermediate composition plagioclase (An 38-40) associated with orthoclase, microcline and quartz. The K-feldspar (K-Fsp) is subhedral whereas crystals of quartz (Qz) are anhedral. Two regions are observed in the image (figure 6). The inside region, which shows orthoclase in association with intermediate plagioclase (An 38) and quartz. In this area are common perthites, microcline-perthite crystals and plagioclase with sericitation (Ollier, 1983) due to volatile-rich residual solutions that induce alterations, so that

pre-existing minerals, (as in the plagioclase) are veined or replaced by new ones (Williams et al., 1958). The outer region, the crystals are slightly smaller, predominantly polysynthetic or zoned twinned plagioclase (about 1.5-2.6 mm) with a predominant alkaline composition (An 26), whose microcracks occasionally are filled with smaller chloritized biotite (about 1.3 mm) (figure 6). In this case the chlorite occurs replacing biotite along rims and lamellae and has been observed in a later stage of biotite weathering (Borelli et al., 2012; Stoch and Sikora, 1976; Ollier, 1983). The chloritization might have occurred under relatively oxidizing conditions (Tabbakh Shabani, 2009). In detail, the core of the image shows a larger crystal of orthoclase (around 10 mm). There is a marked tendency for elongated minerals like biotite sheets (1.4 mm), twin planes in orthoclase and plagioclase (individual or polysynthetic) to be aligned more or less parallel with their major axes, so as to produce a determined lineation. However, in the case of occasional biotites which are perpendicular to the main alignment have a tendency to be folded according to this direction.

Inside the big K-feldspar, microcracks were developed generally arranged in an uneven pattern. However, there is a predominance of microcracks sub-perpendicular to the direction of the greater length of the crystal, and other sub-parallel to the greater length (figure 6). Throughout these microcracks have aligned perthite patterns, as well quartz inclusions and plagioclase crystals (0.4 mm) aligned with the major axis.

These alignments suggest different stages of crystallization, one before when the alkaline feldspars (including potassium and sodium feldspars) and accessory minerals as micas were formed followed for a stage where a reorientation occurred, affecting only the inner region.

An enlargement of figure 6 shows subhedral crystals of plagioclase (Pl, 1.8 mm) associated with subhedral and anhedral crystals of orthoclase (Or, 0.9-2.5 mm) locally developing Albite-Carlsbad and microcline-perthite twins.

Crystals appear as polysynthetic twins (An 34-38) which are aligned with lenticular exsolution lamellae of plagioclase (figure 6, center) and microcline-perthite crystals. Locally exsolved

plagioclase is cut by microcline veins of 1.3 mm. The microcline twinning is most intense adjacent to plagioclase lamellae and has crystallographic continuity with twin planes. This disposition could be result of stage of corrosion and filling by slightly different relationship Na/Ca of Plagioclase (Smith, 1974). In the bottom right of the figure 7, well-developed tartan twinning microcline (around 2.2 mm) with quartz inclusions (0.1-0.3 mm) are observed. In the top left, sheet crystals of biotite (around 0.4-0.7 mm) are mainly oriented parallel to twinning planes. Zircon is included in biotite, developing dark metamictic halos around it. In the bottom, individual crystals are internally affected by microcracks. In the left an orthoclase crystals (0.7 mm) is locally affected by microcracks with angle of 50° or 70°. Besides, zig-zag microcracks are present forming angles of 80-90° with respect to twinning planes or surfaces fractured in an uneven pattern affecting only the crystals inner. Pre-existent stacking fault planes produce local displacement around 0.2 mm affecting the polysynthetic twins. Sericitization are observed in the inner of some plagioclase crystals.

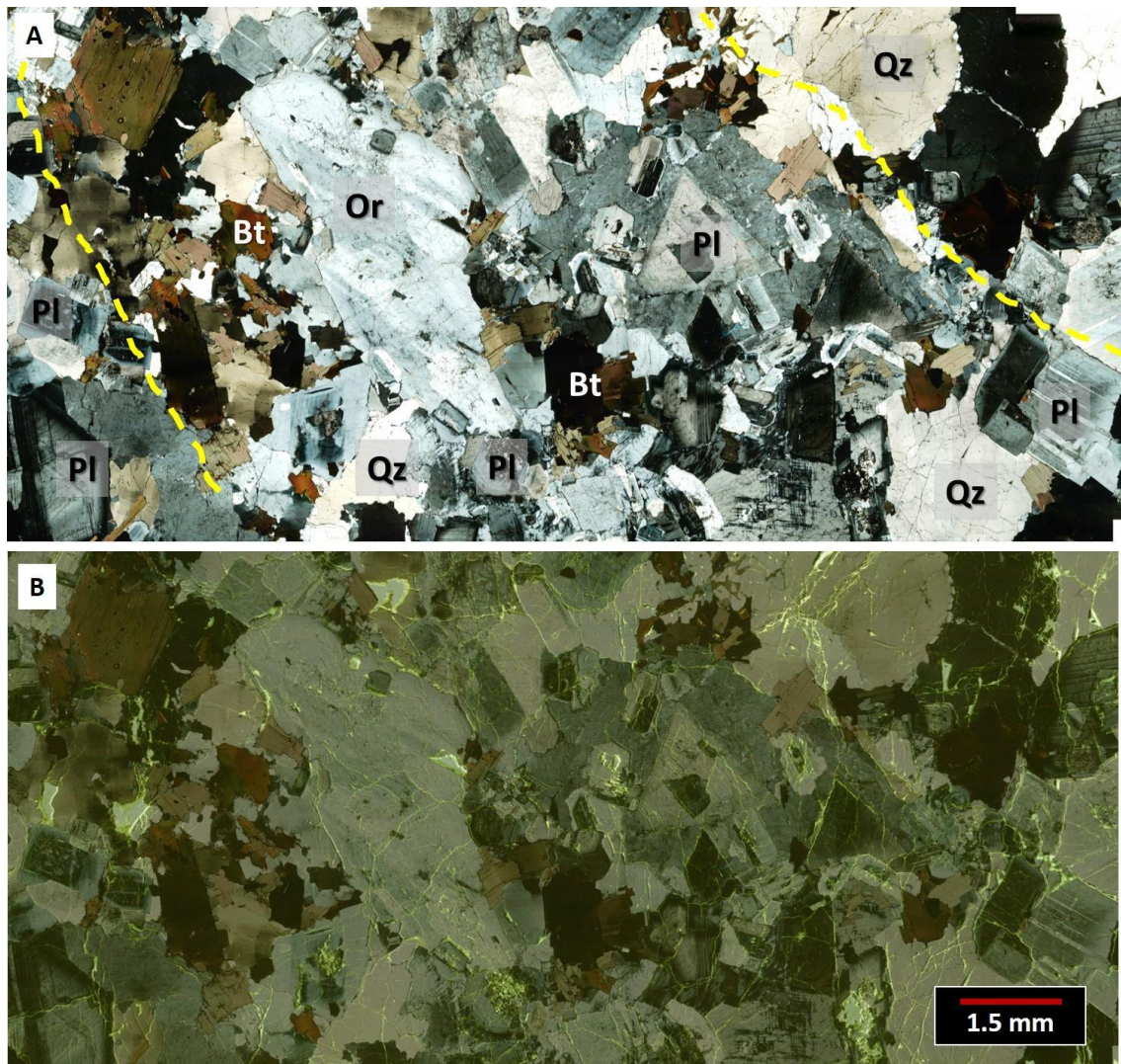


Figure 6. General aspect of the Zarzalejo granite showing the hypidiomorphic granular texture with two regions delimited by discontinuous lines. The inner region shows a big orthoclase crystal (Or) associated to plagioclase (Pl), quartz (Qz) and biotite (Bt). There is a tendency to be aligned the twin planes of plagioclase with the orthoclase, biotite sheets have a tendency to be folded according the same orientation. The outer region shows smaller crystals of plagioclase at left or bigger crystals of quartz at right. A: Polarized light micrograph mosaic, crossed nicols. B: Fluorescence micrograph mosaic overlaid on polarized light micrograph mosaic.



Figure 7. Plagioclase associated to orthoclase (Or) and microcline (Mc). Polysynthetic twins are aligned with lenticular exsolution lamellae of plagioclase (Pl) (In the center). Sericitization process within plagioclase crystals (Ser) and details of microcracks. A: Polarized light micrograph mosaic, crossed nicols. B: Fluorescence micrograph mosaic overlaid on polarized light micrograph mosaic showing the microcracking.

4.3 Petrographic results after thermal tests

In both granites, the thermal processes increased the size of pre-existing open microcracks and facilitated the development of new microcracks. Microcracks propagated mostly by

microstructural planes at nearly orthogonal cleavage, compositional zoning, twins and K-feldspar and plagioclase boundaries. Thus, figure 8 (AL) shows microcracks in plagioclase cores (marked in red) with porosity. These pores increased considerably after the treatments- Another common microcracking propagation plane is at perthite boundaries, as seen in figure 8 (ZA). The right side shows how the microcracks propagate along cleavage planes 001 and 010.

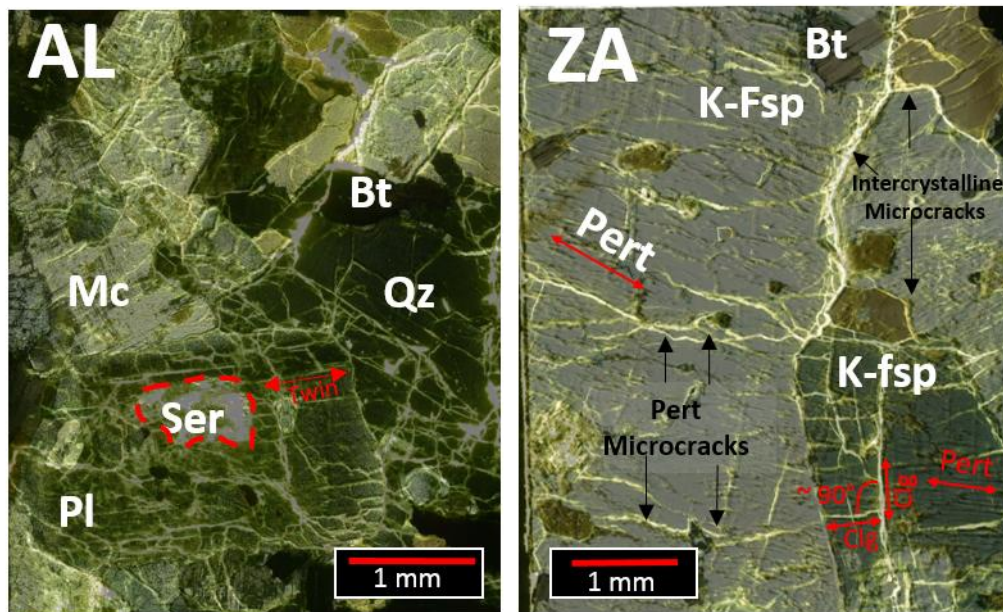


Figure 8. Fluorescence micrograph overlaid on polarized light micrograph.

Alpedrete granite (AL) after 42 TS cycles and Zarzalejo granite (ZA) after 280 FT cycles. Plagioclases (Pl), Potassium feldspar (K-Fsp) perthites (Pert), microcline (Mc) and microcracks in cleavage (Clg). Biotite group (Bt), sericitization processes in plagioclase (Ser) and details of microcracks.

3.3 Quantification of microcracks

Alpedrete granite has fewer pre-existing microcracks than Zarzalejo granite as figure 9 shows. Inter- and intracrystalline microcracks have proliferated in both granitic samples. The TS test increased the microcracks in both granites faster than FT test.

Intracrystalline plagioclase microcracks are more abundant at the end of FT and TS tests in AL sample. However, in ZA sample, the largest number of intracrystalline microcracks occurred in K-feldspar crystals.

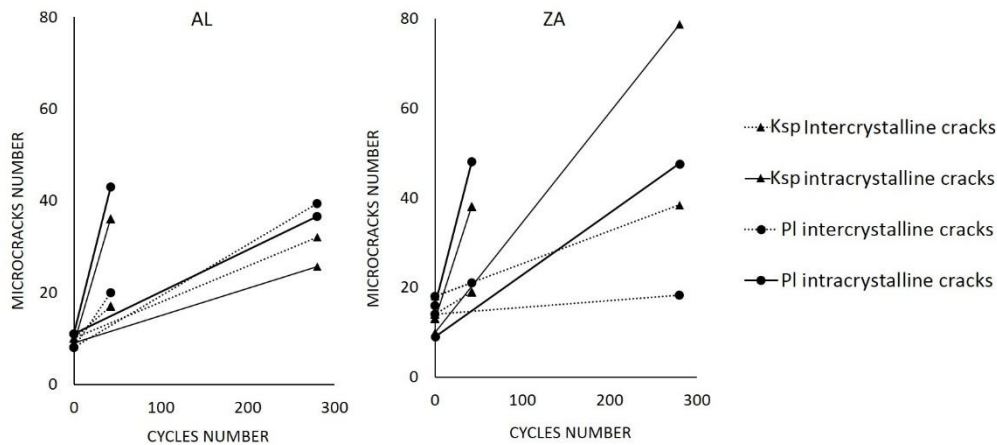


Figure 9. Number of internal microcracks (dotted line) and intracrystalline (solid line) affecting plagioclase (PI) (circles) and k-feldspar (K-Fsp) (triangles) in Alpedrete granite (AL) and Zarzalejo granite (ZA) for 280 cycles of freeze-thaw (FT) test and 42 thermal shock cycles (TS) test.

4 DISCUSSION

The physical decay induced by FT and TS tests generates feldspar microcracks. Clay minerals are formed as a by-product of the plagioclase degradation in granites, which become more susceptible to weathering. This occurs because the alkaline ion content in the water increases gradually with time (Suzuki et al., 1995). The penetration of water and air pollution in contact with the granite surface is facilitated by inter- and trans-crystalline microcracks. These microcracks act as pathways that accelerate chemical weathering of minerals that produce decay.

The petrographic description is representative of these granites, but not exhaustive, due to local changes in the sampling zones. Factors such as local fault regions, environmental conditions including climatic factors (Heins, 1995), geological factors, such as the position in the pluton, either near the margins or the cores are reflected in the texture or mineralogical changes. This is the case of Alpedrete granite placed closer to the pluton core and Zarzalejo granite placed on the pluton margins. In any case, thermal, tectono-thermal or tectonic history (Bard, 1986) could modify this behaviour, implying fracturing or alteration which modify the granite durability, as deduced from the tests carried out by Skinner (1996) or Birch (1996).

The presence of biotite and phyllosilicates in Alpedrete granite microcracks over the fragmented plagioclase (figure 5a) could correspond to crystallization of late stage melt that migrated into the opening space. Similar behavior has been reported in other granites (Vernon, 2004).

Details such as the presence of biotite superimposed on microcrack (figure 5a), bent polysynthetic twins and microcracking of plagioclase parallel and sub-parallel to microcracks indicate some deformation process present in the fresh rock before the treatments.

However, these slight changes and re-accommodation of the minerals; in this granite are specific responses to mechanical stress in plutonic felsitic rocks as reported by Heins (1995). In this regard, the type of deformation is dependent upon the kinds of minerals, interfaces i.e. crystallography and chemistry of adjoining minerals (intercrystalline variations) as well as other crystallographic intracrystalline feature (i.e., twinning planes, zoning patterns, mineral inclusions, etc.). In the case of interfaces, alkaline feldspar, mica and quartz, important advances have been provided by Barber (1990) in respect to the behavior of granite during deformation processes. Aspects including grain size, amount of melt and strain rate may affect the strength and may change the dominant deformation mechanism.

In this case, although relatively few experimental deformation studies have been performed over quartz and feldspar (Barber, 1990), the information of fresh rock is very useful to predict the possible behavior of microcracking of granite feldspar during thermal processes.

The water crystallization in pre-existing microcracks (Freire-Lista et al., 2015a) and thermal expansion of minerals during an accelerated aging tests of the two granites in climatic chambers have created microcracks in K-feldspar and plagioclase. The microcracks propagation mostly following microstructural planes (Přikryl, 2001). As described by Upadhyay; (2012), the feldspar microstructure will largely control microcrack propagation which may be inter- or intracrystalline, depending on crystallographic defects or pre-existing microcracks.

Stünitz et al., (2003) observed in plagioclase that dislocations, twinning and deformation bands are interrelated with microcracks to high temperatures (recrystallization). In both Alpedrete and Zarzalejo granites, the intracrystalline microcracks propagate in feldspars following crystallographic planes, cleavage, twins or dislocations. Pseudo-concentric microcracks develop when intracrystalline microcracks propagate following plagioclase zoning. Furthermore, plagioclase crystals have twins and orthogonal cleavage, and in these planes further propagation of microcracks is possible. Microstructural control is different for K-feldspar and plagioclase (figure 8).

The highest rate of chemical weathering of plagioclase against K-feldspar documented by Taboada and Garcia (1999), is consistent with the increased physical weathering rate found in this study. Plagioclase was subject to more physical decay (microfacturing) than K-feldspar. Svahnberg and Piazzolo (2010) found that the plagioclase core was more susceptible to weathering than its perimeter zone. We observed that in the unstable plagioclase core, where there is more calcium, it is prone to be sericitized (figure 8) due to granite deuteric alteration and physical disintegration. According to Catlos et al. (2011), zoned plagioclase crystals with a high number of core microcracks is probably due to controlled thermal expansion. In our study, the higher microcracks number on the plagioclase core was also observed in the granites undergoing FT cycles, so that the propagation and enlargement of pre-existing microcracks communicates plagioclase cores with other areas, which do not always follow cleavage or twin planes. When water within sericitized plagioclase cores freezes, it creates stress and microcrack propagation, increasing the decay due to the weathering.

By comparing the figures before (figures 4, 5, 6 and 7) and after (figure 8) the FT and TS tests it can be seen how in the early stage many of the microcracks are intercrystalline. Also, there is a greater relationship between the oblique microcracks with crystal microstructure. At the end of the tests it was observed that the propagation of fractures had a marked mineral microstructural component.

Sinha and Alsop, (2010) observed oblique microcracks propagation to microstructural planes K-feldspar and plagioclase of a granitic mylonite. In studies of microcracks due to uniaxial compression (Rao et al, 2004), the microcracks propagation followed the main compressive stress, regardless of the minerals microstructure. In this study, pressure exerted by ice crystallization or by thermal expansion propagated microcracks whose orientation defined by the microstructure of each mineral. Catlos et al. (2011) indicate that microcrack propagation in granite depends not only on the rock mineralogy, but is also dependent on temperature, pressure of crustal depth and/or degree of interaction with hydrothermal fluids.

The microcracks that were caused by the TS test occur due to differences in thermal expansion coefficients between various minerals and also within the same minerals (Alm et al., 1985; Gorbatshevich, 2003). The rate at which a rock undergoes heat exchange (Shao et al., 2014) and thus the deformation can also influence the spread of microcrack propagation and increase width of microcracks. In this study microcrack proliferation was faster in the case of TS than for the FT.

The faster decay capacity of the TS test can be explained because each mineral is directly involved in the microcrack generation, which is caused by the volumetric thermal expansibility (e.g., dV/dT ; Skinner, 1966), leading to relevant extent of microcracks and affecting the whole volume of the rock. Considering K-feldspar crystals and plagioclase, more microcracks are generated in plagioclase due to its higher coefficient of thermal expansion (Skinner, 1966). However, the stresses produced by the FT are located in areas where the water has access and can be frozen. These areas are controlled by the primary porosity, which does not affect the whole volume of the rock. Generally, the exposed area is the most microcracked, where water

accesses and crystallizes outward (Freire-Lista et al., 2015a) increasing pre-existing microcracks or primary porosity of ashlar.

In this case study, the development of microcracks in both granites have been related to the opening of phyllosilicate crystals (e.g., Suzuki et al., 1995). Thus, in the core of plagioclases occurs alteration to phyllosilicates such as sericitization. Illite was not detected in our XRD analyses because only K-feldspar was analyzed or illite concentration may be below the detection limits of the tool. However, petrographic studies indicate a high degree of sericitization, without ruling out the presence of expansive clays. For XRD results the presence of local inversion in the maxima diffraction of the AL sample suggests a preferential direction within orthoclase microstructure. These microstructures favor the formation of weaker planes, dislocations and defects facilitating microcrack propagation.

In both of the studied granites pre-existent microcracks and weak crystals orientation are responsible of their anisotropy (table 1) (Fort et al., 2011). These pre-existing microcracks propagate differently in FT and TS cycles in AL and ZA granites. ZA ends testing with the highest microcracks number in K-feldspar crystals, due to it has higher content of K-feldspar than Plagioclase. Although in relative terms, plagioclase crystals have decay more.

According to Williams et al., (1958) near the margin there is often a tendency for elongated minerals to be aligned with their major axes more or less parallel, so as to produce a distinct lineation. ZA granite quarries are in an area closest to the pluton margin than AL quarries. Our petrographic results have observed K-feldspar and associated minerals orientation in a ZA granite thin section. According to geological data (Brandebourger, 1984), porphyritic granite textures have been observed in Zarzalejo pluton, which could have affected the reorientation of primary minerals and accessories observed in the thin sections. In addition, in heritage buildings that have used ZA weathered granite (figure 10) it is possible to see an orientation in their intracrystalline microcracks. This trend is accentuated by the differential decay of minerals,

corroborating the findings of this investigation. Similarly, at the end of the test it was observed that microcrack propagation has a marked microstructural component, as it is easier to see this orientation in damaged blocks, than in samples without decay.

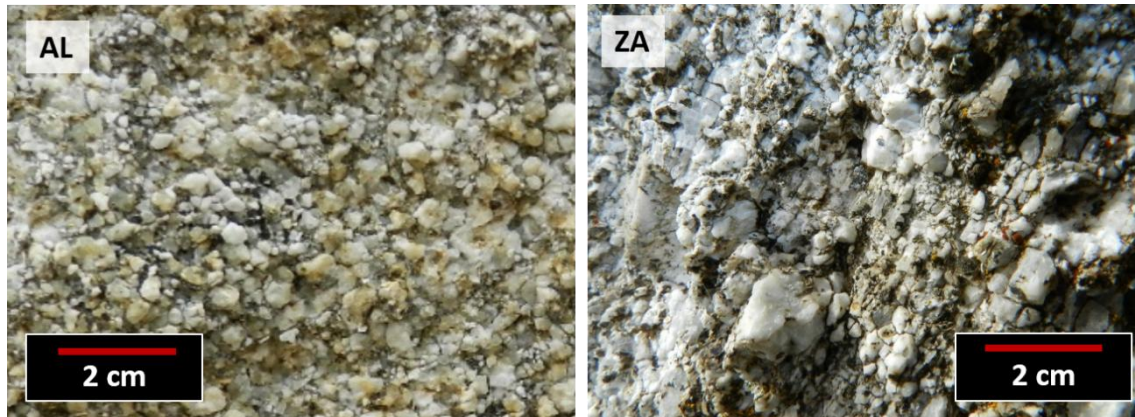


Figure 10. Historical ashlars of altered granite (natural weathering) of AL (Alpedrete granite) and ZA (Zarzalejo granite): microcracks control biological colonization by lichens.

5 CONCLUSIONS

Physical weathering caused by artificial thermal processes (FT and TS tests) generated microcrack propagation in K-feldspar and plagioclase crystals, turning them into smaller crystals. ZA crystals are weakly oriented and this petrographical orientation has not been observed in AL. Ice crystallization resulting from freeze-thaw testing in pre-existing microcracks and volumetric expansion of minerals as a result of thermal shock test produce stresses in K-feldspar and plagioclase crystals that propagate microcracks inherent in weaker microstructural planes. Microcracking of feldspars produces crystal loss on the granite surface and allows other chemical alteration processes to occur predisposing them to weathering by fluid flow or air pollutants. This accelerates the decay process causing the formation of black crusts, and biodeterioration by biological colonization (e.g., lichens and plants), among others.

Stress is located in the pre-existing microcracks and they propagate by crystallographic weaknesses planes, communicating pre-existing microcracks. Microscopic analysis of microcracks versus microstructure feldspars enhances understanding microcrack propagation of

the feldspars. TS test had further granite decay action than FT test. The granite most affected by feldspar microcrack propagation was ZA.

Acknowledgments

This study was funded by the Community of Madrid under the GEOMATERIALS 2 project (S2013/MIT-2914). The authors are members of the Complutense University of Madrid's Research Group: "Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio" (ref. 921349). The authors wish to thank the Geological and Mining Institute of Spain for conducting the thermal shock tests. The petrophysical assessments were run at the IGEO Petrophysical Laboratory, affiliated with the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM) Heritage Laboratory Network (RedLabPat).

The authors thank Mark Wass, English native speaker, for his help in editing this work and anonymous reviews, their comments have been very helpful to improve the paper quality.

REFERENCES

- Alm O, Jaktlund L.L. and Kou S. (1985) - The influence of microcrack density on the elastic and fracture mechanical properties of Stripa granite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 40 (3), 161–179
- Anders M.H., Laubach S.E., Scholz C.H. (2014) - Micromicrocracks: A review. *Journal of Structural Geology*, 69, 377–394.
- Akagawa S., Fukuda M. (1991) - Frost heave mechanism in welded tuff. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2, 301–309.
- Åkesson U., Hansson J., Stigha J. (2004) - Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Engineering Geology*, 72, 131–142.
- Barber D. J., Meredith P.O. (1990) - Deformation processes in minerals, ceramics and rocks. *London: Unwin Hyman*, 423pp.
- Bard J. P. (1986) - Microtextures of Igneous and Metamorphic Rocks. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, Softcover reprint of the hardcover 1st edition, 264 pp.

Brandebourger E. (1984) - Les granitoides Hercyniens tardifs de la Sierra de Guadarrama Systeme Central Espagne. Petrographie et geochemie. PhD Thesis, Universite Lorraine, 209 pp.

Bayram F. (2012) - Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze–thaw in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 83–84, 98–102.

Bernabéu A. Benavente D. Fort R., García del Cura M.A., Martínez-Martínez J. and Mendiña, J. (2004) - Valoración petrofísica del granito de Zarzalejo (Sistema Central) para su utilización como piedra de pavimento en cascós históricos. 6º Reunión Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural. CSIC. Seville, Centro Nacional de Aceleradores.

Birch F. (1996) -Compressibility; elastic constant. *Geological Society of America memoir* 97, 97-173.

Borrelli L., Perri F., Critelli S., Gullà G. (2012) -Minero-petrographical features of weathering profiles in Calabria, southern Italy *Catena* 92, 196–207.

Caracciolo L., Tolosana-Delgado R., Le Pera E., von Eynatten H., Arribas J., Tarquini S. (2012) - Influence of granitoid textural parameters on sediment composition: Implications for sediment generation. *Sedimentary Geology*, 280, 93–107.

Catlos E., Baker C., Sorensen S., Jacob L. and Çemen I. (2011) - Linking microcracks and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: Evidence from the Salihli and Turgutlu plutons in western Turkey (Menderes Massif). *Journal of Structural Geology*, 33, 951–969.

Chen Y, Kobayashi T., Kuriki Y., Kusuda H. and Mabuchi M. (2008) - Observation of microstructures in granite samples subjected to one cycle of heating and cooling. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 49 (4), 217–26.

Eggleton R.A. and Buseck P.R. (1980) - High resolution electron microscopy of feldspar weathering. *Clays and Clay Minerals*, 28, 173–178.

European Standard EN 12371. (2001) - Natural stone test methods–Determination of frost resistance.

European Standard EN 14066. (2003) - Natural stone test methods - Determination of resistance to ageing by thermal shock.

Fort R., Alvarez de Buergo M., Perez-Monserrat E., Varas M.J. (2010) - Monzogranitic batholiths as a supplying source for the heritage construction in the northwest of Madrid. *Engineering Geology*, 115, 149–157. doi:10.1016/j.enggeo.2009.09.001.

Fort R., Varas M.J., Alvarez de Buergo M. and Freire-Lista, D.M. (2011) - Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8, 132–144.

Fort R., Alvarez de Buergo M., Perez-Monserrat E., Gómez-Heras M., Varas M.J. and Freire-Lista D.M. (2013) - Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46, 421–429.

Franzoni E., Sassonia E., Scherer G.W., Naidu S. (2013) - Artificial weathering of stone by heating. *Journal of Cultural Heritage*, 14s, 85–93.

Freire-Lista D.M., Fort R. (2015) - The region of the Piedra Berroqueña: A potencial Global Heritage Stone Province. *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly, 3047.

Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J. (2015a) - Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology*, 113, 40–51. Doi: 10.1016/j.coldregions.2015.01.008.

Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M.J. (2015b) - Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation. *Episodes*, 38 (2), 1–8.

García-del-Cura M.A., Benavente D., Bernabéu A., and Martínez-Martínez J. (2008) - The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers. *Materiales de Construcción* 58, 289-290, 65-79, ISSN: 0465-2746 e ISSN: 1988–3226.

Gómez-Heras M., Smith B. J. and Fort R. (2006) - Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: implications for granular disintegration of granites through thermal fatigue. *Geomorphology*, 78, 236–249.

Gómez-Heras M., Smith B. J. and Fort R. (2008) - Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty. *Environmental Geology*, 56, 547–560.

Gómez-Heras M., Stephen M., Smith B. J. and Fort R. (2009) - Impacts of Fire on Stone-Built Heritage. An Overview. *Architectural Conservation*, 2, 15, 47–58.

Gorbatsevich F.F. (2003) - Decompression mechanism of deep crystalline rocks under stress relief. *Tectonophysics*, 370, 121–128.

Gräf V., Jamek M., Rohatsch A. and Tschegg E. (2013) - Effects of thermal-heating cycle treatment on thermal expansion behavior of different building stones. *Rock Mechanics & Mining Sciences*, 64, 228–235.

Hall K. and Thorn E. (2014) - Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: An attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*, 206, 1–13.

Hallet B, Walder J.S., Stubbs C.W. (1991) - Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained subzero temperatures: Verification from an experimental study using acoustic emissions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2, 283–300.

Heins W.A. (1995) - The use of mineral interfaces in sand-sized rock fragments to infer ancient climate. *Geological Society of America Bulletin* 107, 113–125.

Hor M., Morihito H. (1998) - Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials. *International Journal of Engineering Sciences*, 36 (4), 511–522.

Ingham J.P. (2005) - Predicting the frost resistance of building stone. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38, 387–399.

Inserra C., Biwa S. and Chen Y. (2013) - Influence of thermal damage on linear and non linear acoustic properties of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 62, 96–104.

Iñigo, A.C., Vicente, M.A., Rives, V. (2000) - Weathering and decay of granitic rocks: its relation to their pore network. *Mechanics of Materials*, 32, 555–560.

Iñigo A.C., García-Talagón J., Vicente-Tavera S., Martín-González S., Casado-Marín S., Vargas-Muñoz M., Pérez-Rodríguez J.L. (2013) - Colour and ultrasound propagation speed changes by different ageing of freezing/thawing and cooling/heating in granitic materials. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 71–78.

Iversen E. (1992) - The heritage of Ancient Egypt. Copenhagen, G.E.C. Gad, 123 pp.

Jamshidi A., Reza-Nikudel M., Nikudel, Khomehchiyan M. (2013) - Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model. *Cold Regions Science and Technology*, 92, 29–36.

Kanagawa K., Shimano H., Hiroi Y. (2008) - Mylonitic deformation of gabbro in the lower crust: a case study from the Pankenushi gabbro in the Hidaka metamorphic belt of central Hokkaido, Japan. *Journal of Structural Geology*, 30, 1150–1166.

Kranz R.T. (1983) - Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, 100, 449–480.

Lee M.R. and Parsons I. (1995) - Microtextural controls of weathering of perthitic alkali feldspars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (21) 4465–4488.

Le Pera E. and Sorriso-Valvo M. (2000) - Weathering and morphogenesis in a Mediterranean climate, Calabria, Italy. *Geomorphology*, 34, 251–270.

Lin W., Takahashi M. and Sugita N. (1995) - Change of microcrack widths induced by temperature increase in Inada granite. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 36, 300–304.

Lin W. (2002) - Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite. *Journal of geophysical research*, 107, NO. B10, 2215, doi: 10.1029/2001JB000648.

López-Arce, P., Varas-Muriel, M.J., Fernández-Revuelta, B., Álvarez de Buergo, M., Fort, R., Pérez-Soba, C. (2010) - Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: surface roughness quantification. *Catena*, 83, 170–185.

McLaren A.C., Pryer L.L. (2001) - Microstructural investigation of the interaction and interdependence of cataclastic and plastic mechanisms in Feldspar crystals deformed in the semi-brittle field. *Tectonophysics*, 335, 1–15.

Malaga-Starzec K., Åkesson U., Lindqvist J.E., Schouenborg B. (2006) - Microscopic and macroscopic characterization of the porosity of marble as a function of temperature and impregnation. *Construction and Building Materials*, 20, 939–947.

Martínez-Martínez J., Benavente D., Gómez-Heras M., Marco-Castaño L., García-del-Cura M.A. (2013) - Non-linear decay of building stones during freeze–thaw weathering processes. *Construction and Building Materials*, 38, 443–454.

Matsuoka N., Murton J. (2008) - Frost Weathering: Recent Advances and Future Directions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19, 195–210.

Mehl L., Hirth G. (2008) - Plagioclase preferred orientation in layered mylonites: evaluation of flow laws for the lower crust. *Journal of Geophysical Research*, 113, B05202. DOI: 10.1029/2007JB005075.

Menduiña J., and Fort R. (coordinadors) (2005) - Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX. IGME-IGE, Madrid, 131 pp.

Mills K. (1991) – Metals handbook: Fractography *American Society of Metals*, Asm International, OHIO, 517 pp.

Michel-Lévy A. (1894) - Etude sur la détermination des feldspaths dans les plaques minces au point de vue de la classification des roches. Librairie Polytechnique, Baudry et Cie, Paris, 108 pp. + 18 pp.

Ollier, C.D. (1983) - Weathering or hydrothermal alteration? *Catena*, 10, 57–59.

Ozcelik Y., Careddu N. and Yilmazkaya E. (2012) - The effects of freeze–thaw cycles on the gloss values of polished stone surfaces. *Cold Regions Science and Technology*, 82, 49–55.

Page R. Wenk H. R. (1979) - Phyllosilicate alteration of plagioclase studied by transmission electron microscopy. *Geology*, 7, 393–397.

Pires V, Rosa LG and Dionísio A. (2014) - Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel–hole anchoring systems. *Construction and Building Materials*, 201 (64), 440–450.

Přikryl R. (2001) - Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, 671–682.

Rao M.V.M.S., Murthy D.S.N., Rao G.M.N., Mohanty S.K., Udayakumar S. (2004) - Stress-induced micro-cracking and brittle failure of Godhra Granite, Gujarat: a laboratory investigation using acoustic emission. *Journal of the Geological Society of India*, 64, 775–783.

Reuschlé T., Haore S.G., Darot M. (2003) - Microstructural control on the elastic properties of thermally cracked granite. *Tectonophysics*, 370, 95–104.

Reuschlé T., Haore S.G., Darot M. (2006) - The effect of heating on the microstructural evolution of La Peyratte granite deduced from acoustic velocity measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 243, 692–700.

Scarciglia F., Le Pera E. and Critelli S. (2005) - Weathering and pedogenesis in the Sila Grande Massif (Calabria, South Italy): from field scale to micromorphology. *Catena*, 61, 1–29.

Scarciglia F., Saporito N., La Russa M.F., Le Pera E., Macchione M., Puntillo D., Crisci G.M., Pezzino A. (2012) - Role of lichens in weathering of granodiorite in the Sila uplands (Calabria, southern Italy).

Sedimentary Geology, 280, 119–134.

Schouenborg B.E. (1996) - Frost resistance of natural stones in the nordic countries. *Proceeding of the seventh international conference, London*, 1091–1100.

Seo Y.S., Jeong G.C, Kim J.S., Ichikawa Y. (2002) - Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. *Engineering Geology*, 63, 259–275.

Shao S. and Wasantha P.L.P. Ranjith P.G. and Chen B.K. (2014) - Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70, 381–387.

Skinner B.J. (1966) - Thermal expansion. In Handbook of physical constants. *Geological Society of America Memoirs*, 97, 75–96.

Sinha S., Alsop G.I., Biswal T.K. (2010) - The evolution and significance of microfracturing within feldspars in low-grade granitic mylonites: A case study from the Eastern Ghats Mobile Belt, India. *Journal of Structural Geology*, 32, 1417–1429.

Smith J.V. (1974) - Feldspar minerals, Chemical and Textural Properties, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*, 2, 692 pp.

Sousa L.M.O. Suárez del Río L.M., Calleja L., Ruiz de Argandoña V.G., Rodríguez A. (2005) - Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77, 153–168.

Sousa L.M.O. (2014) - Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 569–588.

Stoch, L., Sikora, W. (1976) - Transformation of micas in the process of kaolinization of granites and gneiss. *Clays and Clay Minerals*, 24, 156–162.

Stünitz H., Fitz Gerald J.D., Tullis J. (2003) - Dislocation generation, slip systems and dynamic recrystallization in experimentally deformed plagioclase single crystals. *Tectonophysics*, 372, 215–233.

Suzuki K., Oda M., Kuwahara T., Hirama K. (1995) - Material property changes in granitic rock during long-term immersion in hot water. *Engineering Geology*, 40 29–39.

Svahnberg H., Piazzolo S. (2010) - The initiation of strain localization in plagioclase-rich rocks: Insights from detailed microstructural analyses. *Journal of Structural Geology*, 32, 1404–1416.

Tabbakh Shabani A.A. (2009) Mineral Chemistry of Chlorite Replacing Biotite from Granitic Rocks of the Canadian Appalachians. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 20, (3), 265–275 <http://jsciences.ut.ac.ir> University of Tehran, ISSN 1016-1104.

Taboada T., García C. (1999) - Pseudomorphic transformation of plagioclases during the weathering of granitic rocks in Galicia NW Spain. *Catena*, 35, 291–302.

Takarli M., Prince W. and Siddique R. (2008) - Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1164–1175.

Tan X., Chen W., Yang J., Cao J. (2011) - Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 68, 130–138.

Tullis J., Yund R.A. (1985) - Dynamic recrystallization of feldspar: a mechanism for ductile shear zone formation. *Geology*, 13, 238–241.

Tullis J., Yund R.A. (1987) - Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: mechanisms and microstructures. *Geology*, 15, 606–609.

Tullis J., Yund R.A. (1992) - The brittle–ductile transition in feldspar aggregates: an experimental study. In: Evans, B., Wong, T.F (Eds.), *Fault Mechanics and Transport Properties in Rocks*. Academic Press, New York, 89–118.

Hadizadeh J. and Tullis J. (1992) - Cataclastic flow and semi-brittle deformation of anorthosite. *Journal of Structural Geology*, 14, 57–63.

Upadhyay D. (2012) - Alteration of plagioclase to nepheline in the Khariar alkaline complex, SE India: Constraints on metasomatic replacement reaction mechanisms. *Lithos*, 155, 19–29.

Vázquez P., Alonso F.J. Esbert R.M. and Ordaz J. (2010) - Ornamental granites: Relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network. *Construction and Building Materials*, 24, 2536–2541.

Vázquez P., Shushakova V., Gómez-Heras M. (2015) - Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: Experimental observations and stress simulation. *Engineering Geology*, 189, 58–67.

Vernon, R. H. (2004) - A practical guide to rock microstructure, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-89133-2.

Villaseca C., Barbero L., Rogers G. (1998) - Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of Central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints. *Lithos*, 43 (2), 55–79.

Villaseca C., Herreros V. (2000) - A sustained felsic magmatic system: the Hercynian granitic batholith of the Spanish Central System. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*, 91, 207–219.

Walder J., Hallet B. (1985) - A theoretical model of the fracture of rock during freezing. *Geological Society of America Bulletin*, 96, 336–346.

Williams H., Turner F., Gilbert Ch. (1958) - An introduction to the study of rocks in thin sections. W.H. Freeman and company. 406 pp.

Wilson M. J. (2004) - Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. *Clay Minerals*, 39, 233–266.

6.6 Microfisuras de descompresión y direcciones de corte en granito de construcción.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (pendiente de envío)

Freire-Lista, D.M. y Fort, R.

Muchos monumentos y ciudades que forman parte del patrimonio de la humanidad han sido contruidos con granito, que sigue siendo una de las rocas de construcción más utilizadas debido a su abundancia, homogeneidad y durabilidad. Los canteros tradicionales han aprovechado los planos de anisotropía de la roca para el corte de bloques en cantera. Ordenados de acuerdo a la facilidad de corte, los canteros denominan a estos planos, la ley, la mano buena y la mano mala.

Determinar la respuesta de cada uno de los tres planos ortogonales de corte ante sus propiedades petrofísicas y petrográficas es fundamental para entender el deterioro en sillares y esculturas labradas en granito. Se ha considerado el granito de Alpedrete para este estudio debido a su amplia representatividad en las construcciones de Madrid.

Se ha cuantificado y medido la longitud y espaciado de microfisuras inter-, intra- y transcristalinas en base a los cristales afectados. Estas observaciones han constatado que el plano de ley (dirección en la que el corte resulta más fácil) del granito de Alpedrete está determinado por la orientación de las microfisuras de descompresión. Es decir, el plano de ley es paralelo a las microfisuras de descompresión, que son rectas e intracristalinas.

El corte de sillares en la dirección de ley se debe a la coalescencia de microfisuras en un plano. Esta superficie de corte con gran planitud minimiza el trabajo y costes de labrado posterior, por lo que ha sido el preferentemente utilizado como la cara vista a la hora de dimensionar los sillares y otros elementos constructivos que configuran los edificios patrimoniales. De este modo, en los paramentos graníticos del patrimonio construido de la ciudad de Madrid se observa que las microfisuras de descompresión están en general orientadas verticalmente.

Esta orientación se debe reproducir a la hora de realizar ensayos de laboratorio, pues las propiedades petrográficas y petrofísicas varían de acuerdo a los planos de corte el granito.

MICROFISURAS DE DESCOMPRESIÓN Y DIRECCIONES DE CORTE EN GRANITO DE CONSTRUCCIÓN.

D.M. Freire-Lista^(1, 2) and R. Fort^(1, 2)

(1) Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC – Complutense University of Madrid UCM. Madrid, Spain (d.freire@igeo.ucm-csic.es, rafort@csic.es)

(2) CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid, Spain

RESUMEN

Muchos monumentos y ciudades que constituyen parte del patrimonio de la humanidad han sido contruidos con granito, que sigue siendo una de las rocas de construcción más utilizadas debido a su abundancia, homogeneidad y durabilidad. Los canteros tradicionales han aprovechado los planos de anisotropía de la roca para el corte de bloques en cantera. Estos planos son, ordenados de acuerdo a la facilidad de corte, ley, mano buena y mano mala.

Determinar la respuesta de cada uno de los tres planos ortogonales de corte ante propiedades petrofísicas y petrográficas es fundamental para entender el deterioro en sillares y esculturas labradas en granito. El granito de Alpedrete es una piedra de construcción utilizada tradicionalmente en Madrid y se ha seleccionado para el estudio de la orientación y distribución de las microfisuras de descompresión.

Se ha cuantificado y medido la longitud y espaciado de microfisuras inter-, intra- y transcrystalinas en base a los cristales afectados. Estas observaciones han constatado que el plano de ley (corte más fácil) del granito de Alpedrete está determinado por la orientación de las microfisuras de descompresión. Es decir, el plano de ley es paralelo a las microfisuras de descompresión, las cuales son rectas e intracrystalinas.

El corte de sillares en la dirección de ley se debe a la coalescencia de microfisuras en un plano. Esta superficie de corte con gran planitud minimiza el trabajo y costes de labrado posterior, por

lo que ha sido el preferentemente utilizado como paramento en los sillares de edificios patrimoniales. O lo que es lo mismo, las microfisuras de descompresión están generalmente orientadas verticalmente en sillares tradicionales de granito..

Esta orientación se debe reproducir a la hora de realizar ensayos de laboratorio, pues las propiedades petrográficas y petrofísicas varían de acuerdo a los planos de corte el granito.

1. INTRODUCCIÓN.

El granito es una de las rocas de construcción más utilizadas debido a abundancia y a sus características petrofísicas, durabilidad y gran homogeneidad composicional y textural. La génesis, historia tectónica y denudación del macizo granítico en donde se asienten las canteras producirá sobre estas piedras microfisuras, discontinuidades planas a escala de cristal o menor, con desplazamiento insignificativo (Passchier y Trouw, 2005, Catlos et al., 2011, Anders et al., 2014) y paralelas a las fracturas de descompresión.

Las fracturas de descompresión, también llamados en inglés exfoliation joint, sheet joint, sheeting, pressure-release, stress-release o unloading joint, post-uplift joint (Ollier y Pain, 2000, Ziegler et al., 2013, 2014) son fisuras naturales que se generan por un mecanismo distensional como resultado de tensiones inducidas por procesos de descompresión en la zona superficial del macizo (Gorbatsevich, 2003, Lin y Takahashi, 2008). La expresión “pressure release” (liberación de presión) está íntimamente ligada a las fracturas de descompresión, resultado de una tensión residual, tensión tectónica, topográfica o por erosión del material que se encontraba por encima o lateralmente (Twidale, 1973).

Ocurren en todas las zonas climatológicas y en muchas clases de rocas diferentes y tienen características específicas comunes en todo el mundo (Nichols, 1980; Holzhausen, 1989, Ziegler et al., 2013, 2014). Son las fisuras naturales más jóvenes, en los afloramientos (Benkó et al., 2014). Son fracturas abiertas (Bahat et al., 1999, Leith, 2012) con disminución de apertura y con aumento de espaciado con la profundidad (de mm hasta varios metros). Normalmente se restringen a unos pocos decámetros, es decir, la profundidad de las canteras, pudiendo llegar en algunos casos a más de 100 m por debajo de la superficie del suelo. Aceleran la alteración y

pueden ser las responsables de movimientos en masa en laderas de granito (Chigira, M. 2001). Pueden coalescer produciendo estructuras macroscópicas o fracturas (Dresen y Guéguen, 2004) y alcanzar continuidad lateral de más de 100 m. Estos planos de coalescencia de fracturas de descompresión se utilizan en las canteras como superficies de arranque de bloques definiendo niveles o bancos (“suelo”). Tienen una orientación subparalela a la superficie actual de relieve o antiguo suelo. Actualmente se utilizan técnicas como Ground Penetrating Radar (GPR) para la localización de las fracturas de descompresión, bloques e identificar la roca fresca en canteras de granito ornamental (Porsani et al., 2006).

La expansión lateral favorecerá una fractura subvertical por lo que los primeros metros de un afloramiento están intensamente fracturados. Estas fracturas de descompresión subverticales son las responsables de la génesis de piedras caballeras o bolos graníticos (Migoñ y Vieira, 2014), residuos de roca sólida presentes en superficies regolito-cubierta, cuya profundidad puede oscilar entre pocos metros hasta 25-30 m (Migon and Vieira 2014) y se están más alterados (Thuro y Scholz, 2004). Las piedras caballeras tendrán planos de fracturas de descompresión pseudoconcéntricas, normalmente paralelas a su superficie, lo que se conoce con el nombre de exfoliación esferoidal.

Para la extracción y dimensionamiento de bloques en canteras se ha utilizado la anisotropía de la piedra, que puede ser mineralógica (acumulación de minerales orientados) o estructurales como microfisuras o fracturas (Gumiel, 2006, Esbert, 2007). Los canteros de granito en todo el mundo han identificado los planos anisotrópicos de debilidad (microfisuras) para el corte tradicional de bloques en la cantera (Chen et al., 1999). Existen tres planos ortogonales de división más fácil, llamada ley, mano buena y mano mala (Osborne, 1935).

La mano buena es la dirección en la que la piedra se divide más fácilmente (Shadmon, 1989, ABNT NBR, 15012, 2013) y la ley (L) es la dirección asociada al plano de corte más fácil (Vasconcelos et al. 2009). Le sigue en importancia el plano mano buena (MB), o la dirección de la segunda división más fácil. La mano mala (MM), es la dirección de la piedra en la que es más difícil de dividir (NBR 15012:2013).

Estas direcciones reciben distintos nombres locales dependiendo de la localización geográfica (tabla 1)

En canteras históricas una buena L y MB eran esenciales para su explotación, de modo que los bloques podían ser adecuadamente cortados con el menor esfuerzo o trabajo posible. Una cantera de granito sin, o con una débil ley, no era productiva.

Hoy en día el granito se corta normalmente con herramientas diamantadas, por lo que el plano de ley no va a condicionar una cantera, aunque sigue siendo importante para la definición de bancos y extracción de grandes bloques en canteras, por lo que las microfisuras de descompresión están presentes en los sillares y placas de granito.

Tabla 1. Nombres del plano de corte en distintos idiomas.

English	Rift/run	Grain	Hardway/ headgrain
Spanish	Ley/hilo	Mano buena	Mano mala
Japanese	Ichino-me	Ninome-me	Sanno-me
Swedish	Svall		Borst
Austria	Heber	Gang	Schechle Seite
Norwegian	Kløv		Bust
Brazilian	Corrida	Segundo	Trincante

Las piedras caballeras han sido utilizadas por los canteros tradicionales para la elaboración de sillares para ser utilizados en construcción de monumentos (Fort, R., 2010, Freire-Lista et al., 2015).

La diferencia en un sillar extraído en una cantera, realizado a partir de roca madre y uno a partir de una piedra caballera radica en que el extraído de la cantera, el plano de los fracturas de descompresión será seudoparalelo a la superficie, es decir, en una dirección, mientras que el procedente de una piedra caballera, tendrá un microfisuras de descompresión pseudoconcéntricas, lo que produce descamación esferoidal.

Las microfisuras generadas por la descompresión son rectas e intragranulares (Lin y Takahashi, 2008). Los golpes de maza de los cortadores en la dirección de las microfisuras de descompresión o ley producen la coalescencia (Yin et al., 2014) de las fisuras de descompresión. Por esta razón los cortes siguiendo esta dirección darán planos-caras con gran planitud.

La planitud de un bloque minimiza el trabajo y el coste de tallado posterior a la extracción de sillares. Por lo tanto, los planos de coalescencia de microfisuras de descompresión han sido los preferentemente elegidos para ser labrados, siendo generalmente los utilizados como paramento o cara vista en los sillares de edificios de construcción tradicional. Es decir, la anisotropía del granito definida por las microfisuras de descompresión generalmente determinaba cual sería la cara labrada que se utilizaba como paramento.

España cuenta con grandes reservas de granito y produce y exporta granito de construcción a todo el mundo. Concretamente los granitos del Sistema Central Español denominada Piedra Berroqueña, constituyen uno de los mayores batolitos hercínicos europeos, Villaseca (2003). Los canteros de Piedra Berroqueña (Freire-Lista y Fort, 2015a, b) aprovechan las diaclasas de edad Alpina, con dirección N-S (*Pelo*) y las orientadas E-W y (*juntas o salistrones*) (Sevillano et al., 2001), para la definición y extracción de bloques. Para la creación de niveles o bancos en la cantera, utilizan las fracturas subhorizontales, fracturas de descompresión.

Tradicionalmente los canteros experimentados han identificado la dirección de microfisuras de descompresión por la rugosidad del plano en corte fresco. Estos planos (L) tienen un tacto más suave o liso que las caras en otra dirección anisotrópica (MB o MM)

El granito ornamental ha sido un material de construcción muy utilizado en fachadas, muros o zócalos de edificios, bases de grandes estructuras o pedestal de estatuas (Freire-Lista et al., 2015c). La absorción de agua por capilaridad y la permeabilidad al aire de un mismo sillar de granito dependerá de la dirección en la que se coloque de acuerdo con la orientación de las microfisuras de descompresión, dando lugar a una mayor o menor duración de la piedra con la formación de patologías tales como desplazados o descamados que se desarrollarán de distinta

forma en los planos de L, MB y MM. La colocación de la piedra en los edificios en base a su anisotropía (Fort et al., 2011) definirá el comportamiento mecánico y durabilidad ante procesos de deterioro. Especialmente cuando estas microfisuras están sujetas a cambios de temperatura (Gómez-Heras, 2009, Freire-Lista et al., 2015a, b).

Los objetivos de este paper son determinar instrumentalmente qué orientación estructural es la responsable de la anisotropía del granito utilizado en construcción, caracterizar la anisotropía de distintas propiedades petrofísicas en las orientaciones de corte (L, MB y MM) en sillares de granito utilizados en el patrimonio construido. Lo que permitirá reproducir esta orientación en ensayos petrofísicos, especialmente en la realización de ensayos de envejecimiento artificial acelerado para estudiar la anisotropía en la durabilidad de probetas de granito y aplicarlo a sillares de sustitución en edificios de construcción tradicional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha utilizado el granito de Alpedrete (AL) para medir la anisotropía de las propiedades petrofísicas debidas a las microfisuras de descompresión. Las canteras se encuentran en la Sierra del Guadarrama (Sistema Central Español), aproximadamente a 40 km de Madrid. Este granito ha sido ampliamente utilizado como material de construcción en Madrid y sus alrededores para la construcción de importantes edificios. AL ha sido nominado como Global Heritage Stone Resource (Freire-Lista et al., 2015) por su importancia patrimonial.

Existen muchas referencias sobre su origen (Villaseca et al., 1998, Villaseca and Herreros, 2000, Villaseca et al., 2009, 2012); deformación tectónica y evolución topográfica (De Vicente et al., 2007), sus canteras históricas (Fort et al., 2010, 2013) características petrológicas y petrofísicas (Gómez-Heras, et al., 2008, Fort et al., 2011, Freire-Lista et al., 2015c), de durabilidad, (Fort et al., 2011, Freire-Lista et al., 2015 a, b) o edificios construidos con él, (Fort et al., 2004, 2010, 2013a,b, Menduiña y Fort, 2005, Pérez-Monserrat et al. 2013). AL es un monzogranito equigranular medio a fino (Figura 1). Este granitoide se clasifica como un monzogranito subidiomorfo y equigranular de grano medio, su mineralogía según Fort et al.,

2011 está formada por cuarzo es (2-3mm y 55-60 % vol.), plagioclasa (1-3 mm y 20-23 % vol.), feldespato potásico (microclina; 2-4 mm y 7-10 % vol.) y biotita (1-2 mm y 10-15 % vol.) Puede tener minerales accesorios como ilmenite, apatite, cordierite and zircon.

El granito de AL tiene una textura holocristalina, hipidiomórfica, granular con el feldespato paragénesis típica plagioclasa-cuarzo-potasio, plagioclasa se presenta en cristales subhedrales tipo oligoclasa, siendo ligeramente alcalino en los bordes. En general, desarrolla maclas en la plagioclasa, zonificación. Cuarzo ocupa espacios intermedios irregulares. El feldespato es ortoclasa, por lo general caolinizada y con texturas pertítica. Cristales laminares de biotita se presentan distribuidos al azar en toda la muestra.

Las muestras han sido extraídas de una cantera histórica de granito, situada en Alpedrete (40°39'45.7"N 4°00'47.7"W) (Fig. 1), aprovechando el plano subhorizontal de la ley se ha cortado un bloque de forma tradicional, siguiendo los planos de corte ortogonales de L, MB y MM (Figura 2), con la ayuda de un cantero. Los planos de corte fueron marcados en las muestras.

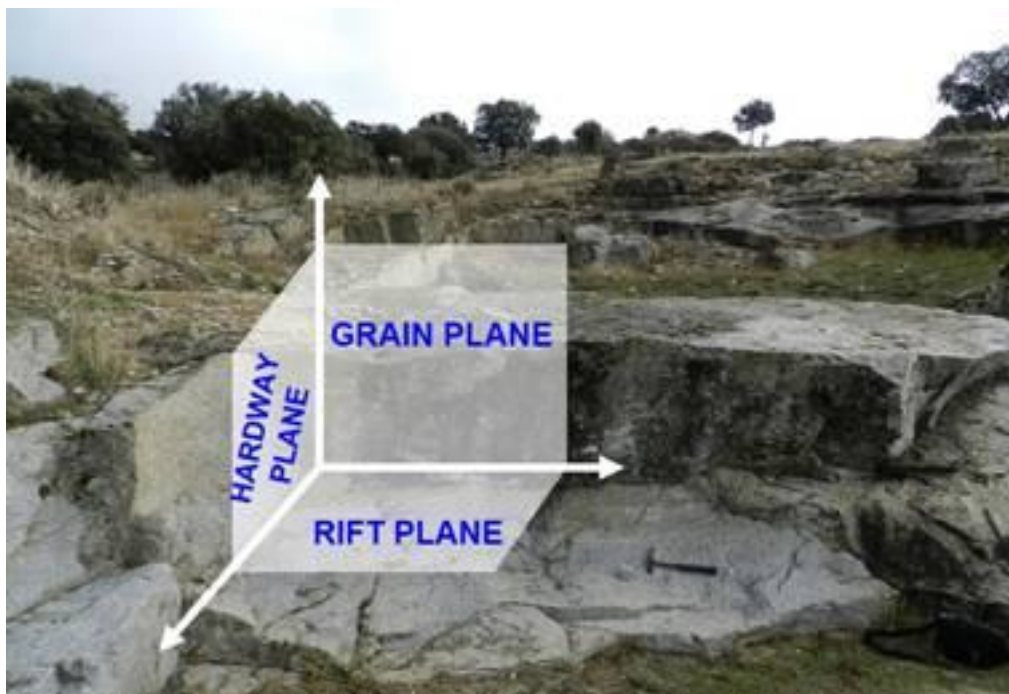


Fig 1. Frente de cantera histórica con la indicación de las direcciones de ley, mano buena y mano mala.

La rugosidad óptica superficial en cada una de las superficies se midió sobre este bloque y después se han cortado a una velocidad baja de 120 rpm y baja tensión, 10 probetas de

7×7×7 cm. De una probeta se realizaron láminas delgadas y se extrajeron lascas en cada uno de los planos L, MB y MM para observaciones con microscopía óptica y electrónica. En las 9 probetas restantes se midieron las siguientes propiedades:

Dureza superficial, velocidad de propagación de ondas de ultrasonido P y S (V_p y V_s), absorción capilar y permeabilidad al aire. Los ensayos se han realizado en las tres direcciones (L, MB y MM) en las mismas 9 probetas secas en horno a 70°C, hasta alcanzar peso contante ($<1\%$ de variación en dos pesadas consecutivas en 24 h) y a temperatura ambiente (se enfriaron en un desecador con gel de sílice).



Fig.2. Corte de bloque de granito según procedimiento tradicional. A: marcado de la dirección de ley. B: Picado de la línea de ley C: Perforación de agujeros con cincel y maza para meter la cuña. D: Se meten las cuñas y posteriormente se golpean para que se corte el bloque.

Técnicas analíticas

Rugosidad óptica superficial (OSR)

La microrrugosidad de los planos de rotura L, MB y MM (de las muestras sin serrar o pulir) han sido medidas. La rugosidad óptica superficial ha sido medida, con un rugosímetro portable (3 luces blancas en un ángulo de 120°) TRACEiT, no destructivo. Este equipamiento Permite el análisis de alta precisión 3D-topografía, en una micro-escala (micrómetros). Campo de medición es de 5 mm × 5 mm, la resolución es de 2,5 uM (eje Z) y 2,5 mM (en ejes X / Y). Número de puntos de datos en la X / ejes Y están 2000. Los parámetros de rugosidad fueron calculados por el software y definen como se estipula en la norma DIN EN ISO 4287.

Ra es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil de la línea media; Rq Representa la raíz cuadrada de la desviación del perfil evaluado, y Rz es la suma de las distancias verticales entre los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos dentro de la longitud de muestreo. El corte (λ_c) utilizado para los cálculos es de 0,80 mm. 15 medidas de en cada plano L, MB y MM de cada probeta se han realizado y calculado la media.

Fractografía

Tres láminas delgadas fueron seccionadas de una muestra orientada de acuerdo con las direcciones de corte del granito de AL (Fig. 3). Una horizontal, paralela a las microfisuras de descompresión, en la dirección (L) y dos perpendiculares a las microfisuras de descompresión: en la dirección mano buena (MB) y en la dirección mano mala (MM).

Todas las láminas delgadas se impregnaron con fluorescencia y se caracterizaron bajo una Olympus BX 51 microscopio de luz polarizada (PLM) equipado con 12 acoplado-DP (6 V / 2,5 Å) Olympus micrografía digital y el software DP-Soft Olympus (versión 3.2). Microfisuras fueron caracterizadas con el mismo equipo, así como con la misma configuración utilizando una lámpara de mercurio de microscopía de fluorescencia Olympus U-RF-T (FM).

Cada mosaico compuesto aproximadamente por 100 micrografías de la misma zona, de aproximadamente 10 cm^2 . Lo micrografía de nicoles cruzados se utilizaron para la cuantificación de minerales, y la fluorescencia para estudiar mosaicos de microfisuras.

Todas las láminas delgadas fueron impregnadas con fluorescencia y caracterizadas bajo un Olympus BX 51 microscopio de luz polarizada (PLM) equipado con DP 12-coupled (6 V/2.5 Å) Olympus digital micrography and Olympus DP-Soft software (version 3.2). Las microfisuras fueron caracterizadas con el mismo equipo, así como con la misma configuración utilizando una lámpara de mercurio de microscopía de fluorescencia Olympus U-RF-T (FM).

Cada mosaico está compuesto aproximadamente por 100 micrografías de la misma zona, de aproximadamente 10 cm^2 . Los mosaicos de nicoles cruzados se utilizaron para la cuantificación de minerales, y la fluorescencia para estudiar microfisuras mosaicos micrographs del mismo área, midiendo aproximadamente 10 cm^2 . El micromosaico FM se colocó sobre el micromosaico PM y sobre esta fusión se ha marcado un rectángulo ($1,5 \times 2\text{ cm}$) dividido en 12 cuadrados de 25 mm^2 , los lados de este rectángulo son paralelos y perpendiculares a las intersección de las microfisuras de descompresión con los planos MB y H. En el plano R, el rectángulo es paralelo a las microfisuras de descompresión (Figura 3). Las microfisuras se cuantificaron contando el número total que cortaron los lados de estos cuadrados (un total de 155 mm lineales), así como el número que atraviesan cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. El conteo de las microfisuras de los planos R, MB y MM con microscopía óptica de polarización y fluorescencia permitió ver y cuantificar las microfisuras de descompresión, cuya orientación en el sillar controlará los parámetros petrofísicos y su durabilidad. Esta técnica se ha utilizado para la cuantificación de microfisuras generados por procesos de hielo-deshielo y choque térmico en granitos (Freire-Lista et al., 2015a, d).

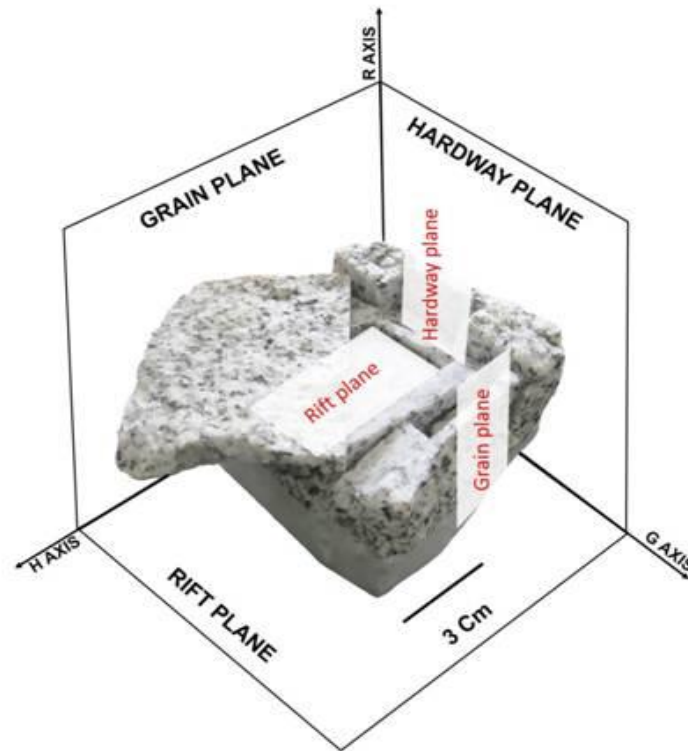


Fig.3 Bloque de granito de Alpedrete de donde se han extraído las tres láminas delgadas, en el plano de Ley, plano de Mano buena y plano de Mano mala.

Por último, se calculó la densidad lineal de microfisuras (LCD) de microfisuras de descompresión (Sousa, 2014). Es decir, el número de microfisuras que han intersectado las 5 líneas perpendiculares a las microfisuras de descompresión figura 4, dividido por la longitud total de esta líneas (75 mm). También se ha medido la longitud y el distanciamiento medio de microfisuras de descompresión en las mismas líneas.

Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

El estudio morfológico de la superficie de rotura de los planos ley, mano buena y mano mala de pequeñas lascas del granito de Alpedrete fue realizado con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6400. Centrándonos principalmente en el relieve superficial y dirección de las microfisuras. Las condiciones del análisis han sido 0.2^{-40} kV de aceleración de voltage,

corriente de 6×10^{-10} A, y vacío de 10^{-5} Torr, resolución de 35 Å, a distancia de 8 mm y 35

kV and 20 kV de aceleración de voltage para la adquisición de imágenes. El espectrómetro utilizado fue un microanalizador de energía dispersiva de rayos X (EDS) modelo Oxford Inca con una resolución 133 eV–5,39 kV. Las muestras ($< 1\text{cm}^3$) se han metalizado con oro para hacerlas conductoras.

Dureza superficial

Para medir la dureza superficial, se ha utilizado un Equotip 3 (D) con una energía de impacto de 11 N/mm. Se han tomado 10 medidas en cada cara serrada de las 9 probetas cúbicas y se ha calculado la media para cada plano L, MB y MM. Las medidas se han realizado con el instrumento hacia abajo, vertical y perpendicular la superficie plana y dentro de los 5 mm de los bordes de los cubos para evitar posibles efectos de borde. Teniendo cuidado en no medir en las inmediaciones de huecos visibles en la superficie de la roca.

El valor de dureza se expresa como el número de Leeb (valor L) o la dureza de Leeb (HL), que es la relación de la velocidad de rebote a la velocidad de impacto multiplicado por 1000.

Velocidad de propagación de ultrasonidos (V_p and V_s)

Para la medida de velocidad de propagación de ondas S (V_s) se ha utilizado un equipo emisor-receptor Panametrics de alto Voltaje (Modelo 5 058 PR) conectado a un osciloscopio Tektronix de fósforo digital (modelo TDS 3 012 B) con transductores Panametrics V151 de 25,4 mm de diámetro y 0,5 MHz acoplados a las muestras con un gel compuesto por 80 % de azúcares (principalmente fructosa y glucosa) y aproximadamente el 20 % de agua. Las condiciones de ensayo fueron: frecuencia de repetición de pulso, 20 Hz y de amortiguación de 200 Ω.

V_p y V_s han sido medidos 4 veces en cada cara perpendicular a cada plano de ley, mano buena y mano mala de 9 probetas calculando la media de cada probeta.

En edificios históricos no siempre es posible realizar ensayos de resistencia mecánica de forma directa, que implica la rotura de las probetas. En este caso los módulos dinámicos se deben obtener mediante técnicas no destructivas (a partir de la V_p y V_s) (Christaras et al., 1994).

Los módulo elásticos, relación de Poisson (ν), módulo de Young (E), módulo de cizalla (G) y módulo de compresibilidad (K) se obtuvieron mediante técnicas no destructivas (a partir de la V_p y V_s) de Acuerdo con las ecuaciones,

$$\nu = (V_p/V_s)^2 - 2 / [(V_p/V_s)^2 - 1]$$

$$E = \rho b [3 V_p^2 - 4 V_s^2] / [(V_p/V_s)^2 - 1]$$

$$G = \rho V_s^2$$

$$K = \rho [V_p^2 - (4/3) V_s^2]$$

Donde, V_p es el valor de la velocidad de ondas longitudinales (m/s); V_s es el valor de la velocidad de ondas transversales (m/s); ν es la relación de Poisson's; E es el módulo de Young (GPa); K es el módulo de compresibilidad (GPa); G es el módulo de cizalla (GPa) y ρ es la densidad aparente.

Capilaridad

Se llevó a cabo el ensayo de capilaridad como se especifica en el estándar UNE-EN, 1925, 1999, con ligeras modificaciones. Se han pesado las probetas después de secarlas (m_d) con una precisión de 0,01 MB y se calculó el área de la base (expresando el área en m^2) con una precisión de 0,1 mm.

Se colocan las 9 probetas de granito sobre un tanque, 3 probetas apoyándose sobre el plano L, otras tres sobre el plano MB y otras tres sobre el plano MM. Es decir, asegurándose que la orientación de los planos de microfisuras de descompresión sea paralelo en 3 probetas y en otras 6 perpendicular a la lámina de agua en la que se ha sumergido (3 ± 1) mm la base de las probetas. Periódicamente se realizaron pesadas para conocer la cantidad de agua absorbida.

Las 9 muestras se ensayaron durante 912 horas, hasta que el ascenso capilar se estabilizó en todas las probetas.

Se calculó el coeficiente de absorción de agua (C) obteniendo la media de las medidas de las tres probetas apoyadas en cada plano (L, MB, MM).

Permeabilidad al aire

Se ha utilizado un permeámetro de aire portátil y no destructivo minipermeameter "TinyPerm II" (miniPERM Perm Tiny = MTP) de New England Research Inc). Este equipo mide el tiempo que tarda un volumen de aire en ser absorbido por el granito. Posteriormente, esta tasa puede transformarse a permeabilidad al aire, en milliDarcy (mD).

El MTP tiene una boquilla de caucho, para garantizar su estanqueidad, de 22 mm de tamaño con un diámetro de entrada de 9 mm que se presiona contra la muestra de roca.

Posteriormente, se genera un vacío en la parte interior del instrumento, un microcontrolador controla el volumen de aire retirado de la roca y el vacío transitorio. Después se disipa el vacío, el microcontrolador calcula un valor característico de acuerdo a los parámetros medidos. El MTP proporciona un valor T, tiempo vinculado a la permeabilidad al aire (K, millidarcys (MD) ecuación.

$$T = -0.8206 \times \log_{10} (K) + 12.8737$$

La anisotropía en la permeabilidad con relación a los planos de corte se ha medido con el equipo en posición estática vertical, sobre la superficie plana de las probetas y sujeto con una mordaza, para proporcionar una presión de contacto uniforme durante el ensayo.

Se han obtenido 5 medidas de permeabilidad a lo largo de cada plano (L, MB y MM) de las 9 probetas. Finalmente se ha calculado la media de las medidas para cada plano.

Anisotropía

El grado de anisotropía en las rocas puede depender de la propiedad física particular medida (Lin y Takahashi, 2008). De cada una de las propiedades físicas evaluadas se ha obtenido el índice de anisotropía. Se han obtenido los parámetros de anisotropía total (dM) y anisotropía relativa (dm) (Guydader y Denis, 1986) para cada una de las propiedades físicas calculadas, en las direcciones L, MB y MM

$$dM\% = [1 - (2 PPV_{\min} / (PPV_{\text{mean}} + PPV_{\max}))] \times 100$$

$$dm\% = [(2 \times (PPV_{\max} - PPV_{\text{mean}}) / (PPV_{\text{mean}} + PPV_{\max}))] \times 100$$

$$dM\% = [1 - (2V_{(p,s) \min} / (V_{(p,s) \text{ mean}} + V_{(p,s) \max}))] \times 100$$

$$dm\% = [(2 \times (V_{(p,s) \max} - V_{(p,s) \text{ mean}}) / (V_{(p,s) \text{ mean}} + V_{(p,s) \max}))] \times 100$$

Las tres propiedades físicas que se muestran en los cálculos de anisotropía se refieren al valor encontrado para las tres direcciones ortogonales en el espacio: PPVmax es el valor máximo promedio de la propiedad física en una dirección, PPVmin es el valor mínimo y la media es de PPVmean el valor medio de la propiedad física.

Los índices propuestos por Guydader y Denis (1986) distinguen entre anisotropía en dos dimensiones (dm) y tridimensional (dM), que afecta al comportamiento hidráulico y al deterioro de estos materiales. Estos índices indican la dirección espacial de la anisotropía, ya sea orientación estructural, mineralógica o textural.

3. RESULTADOS.

Microrrugosidad

La microrrugosidad superficial de material de piedra determina la interacción superficial entre las microfisuras de descompresión y los minerales. Esto es más acentuada cuando se consideran fracturas naturales.

Los índices de rugosidad medidos son mayores en la dirección mano mala que en la de ley, de esta forma, el Ra es un 13,1 %, el Rq un 12,4 % y el Rz un 12,2 % mayor en la dirección de mano mala como se aprecia en la tabla siguiente

Tabla 1- Parámetros de rugosidad según el plano de extracción de 3 sillares

	LEY	MANO BUENA	MANO MALA
Ra	2,2 ± 0,8	5,2 ± 1,3	6,1 ± 1,9
Rq	3,1 ± 1,1	6,9 ± 1,9	8,0 ± 2,5
Rz	10,0 ± 4,0	18,7 ± 5,5	22,8 ± 7,3

Fractografía.

Como se observa en la figura 4, las mayoría de las microfisuras siguen una dirección preferente, siendo en su mayoría paralelas a la dirección de ley.

La dirección que ha cortado más fracturas ha sido la MM y la dirección que ha cortado menos fracturas ha sido la L. Los resultados del conteo de microfisuras en la lámina delgada paralela al plano de MM ha cortado 197 fracturas, mientras que la red paralela al plano grain ha cortado 140 y en la dirección paralela a las microfisuras de descompresión se han cortado 97 fracturas (table 2).

Las microfisuras paralelas a la superficie de la cantera, es decir, las debidas a descompresión, o microfisuras de descompresión han sido el 53% en el plano MM, 52% en el plano MB y el 0 % en el plano L, por ser este plano paralelo a estas microfisuras. Como se puede ver en la fig. 4 y en la tabla 2, la mayoría de las fracturas intracristalinas son microfisuras de descompresión.

Tabla 2. Número total de microfisuras Inter cristallinas, microfisuras de descompresión y otras microfisuras.

MC type	Mano mala	Mano Buena	Ley
Inter-crystalline	65	58	55
Exfoliation microcraks	94	73	0
Other	20	9	42
Total	179	140	97

En la tabla 3 se han ponderado las microfisuras de descompresión con relación al porcentaje de minerales presente en las muestras para observar cómo se propagan las microfisuras de descompresión en los distintos minerales.

En la tabla 3 se puede observar el número de microfisuras Intercristalinas, de descompresión y otras microfisuras afectando a cuarzo (Qtz), plagioclasa (Pg), Feldespato potásico (Fk) y biotita (Bt) en la red de 155 mm lineales paralela a los planos de ley, mano buena y mano mala de las tres láminas delgadas cortadas en estas direcciones

Tabla 3 número de microfisuras Intercristalinas, de descompresión y otras microfisuras afectando a cuarzo (Qtz), plagioclasa (Pg), Feldespato potásico (Fk) y biotita (Bt) en la red de 155 mm lineales

Mineral	MC type	Mano mala	Mano buena	Ley
Qz	Intercristalinas	37	41	28
	Descompresión	37	26	0
	Otras	9	4	9
Pl	Intercristalinas	15	8	16
	Descompresión	26	19	0
	Otras	6	1	11
K-Fsp	Intercristalinas	8	8	10
	Descompresión	30	27	0
	Otras	5	4	21
Bt	Intercristalinas	5	1	1
	Descompresión	1	1	0
	Otras	0	0	1

La tabla 4 muestra los valores ponderados con relación al porcentaje de cuarzo, plagioclasa, fedespato potásico y biotita en las muestras. Se observa que el mineral más propenso a la propagación de microfisuras es el Fk. Seguido del Qtz, Pg y Bt.

Table 4. Número de microfisuras de descompresión ponderados

Mineral	Hard	Grain	Rift
Qz	91	64	0

Pl	85	6	0
k-Fsp	118	106	0
Bt	33	33	0

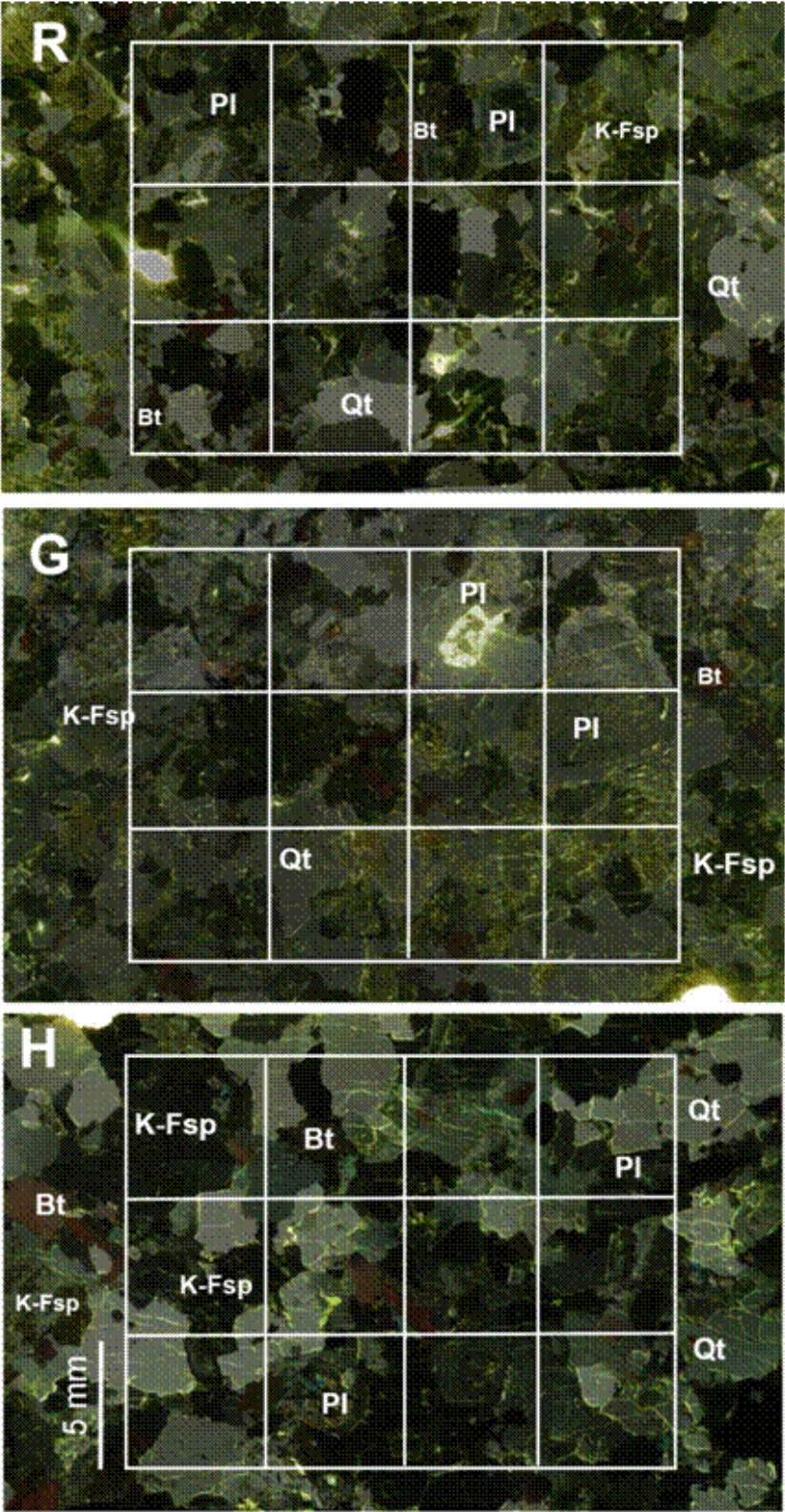


Fig. 4. Micromosaicos de PM superpuesto al de MF del granito de Alpedrete, de arriba a abajo: R: Plano paralelo a la dirección de Ley. G: Plano paralelo a la dirección de mano buena, H: Plano paralelo a la dirección de mano mala. Bt: Biotita, Fk: Feldespato potásico, Qtz: cuarzo, Plg: plagioclasa.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Los planos de mano mala (a) y de ley (b) se observan en la figura 5. Las microfisuras en la imagen a tienden a ser perpendiculares al plano mano buena, es decir, se propagan en la dirección del plano de ley. Mientras que en la fotografía b se observa el plano de rotura (ley) cuyas microfisuras son paralelas a la superficie.

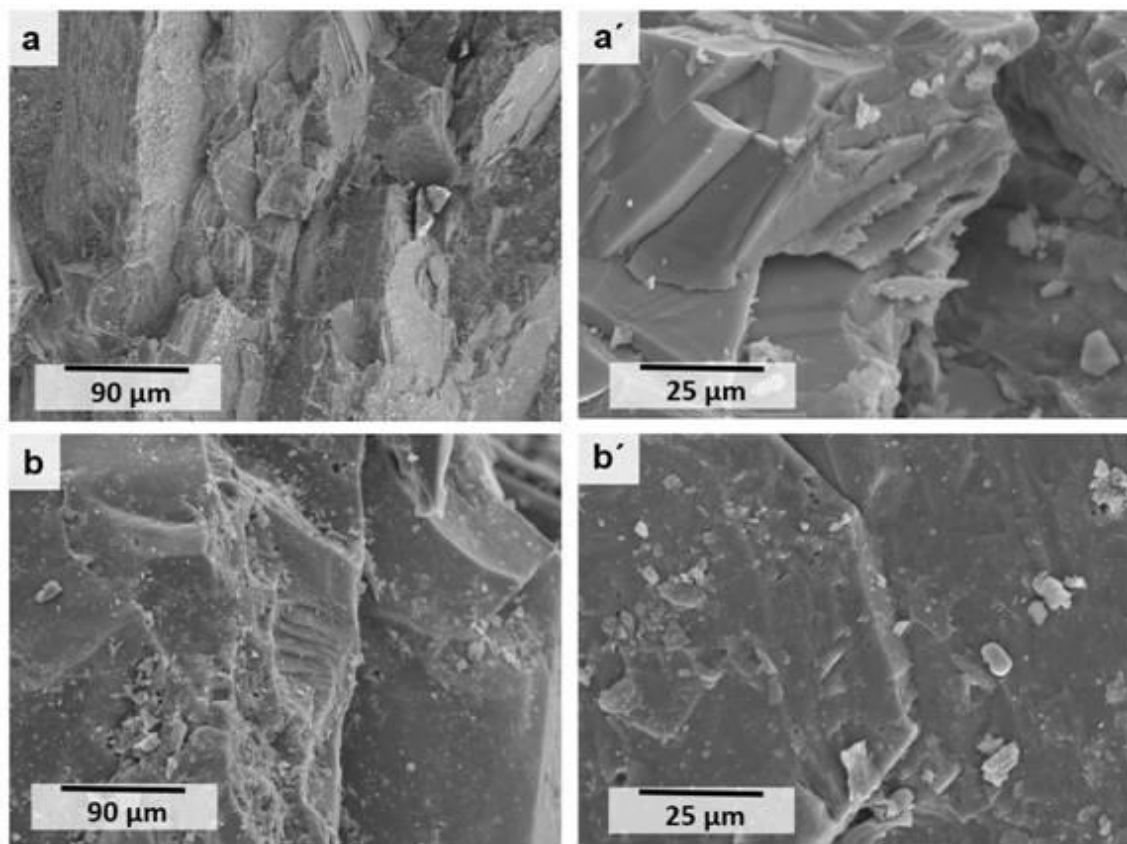


Figura 5. Imágenes de SEM. (a) plano mano mala, (b) plano ley.

Microdureza superficial.

Los datos de microdureza en cada plano del granito, se pueden observar en la table5. Los tres planos presentan una alta dureza L, siendo muy similar en los tres planos. El plano MB es el que mayor L presenta y MM el que menor L presenta.

Tabla 5 valores de microdureza medidos en la superficie de los planos de lay, mano buena y mano mala.

Eje	Promedio microdureza (L)
MM	856±15.5
MB	887±11.3
L	874±7.9

Velocidad de propagación de Ultrasonidos y anisotropía

Las velocidades de propagación V_p y V_s , se muestran en la tabla 6. La dirección perpendicular a las microfisuras de descompresión (plano L) tiene una velocidad de propagación de ondas p ultrasonidos un 17,6 % menor que la dirección perpendicular las plano MM y un 12,2 % menor que la dirección del plano MB. Mientras que la V_s perpendicular al plano MM es un 2% menor que la media perpendicular al plano MB y un 5,7% mayor que la V_s medida perpendicularmente al plano L. La anisotropía total del granito de Alpedrete medido en las direcciones de corte es del 13%.

Tabla 6. Velocidad de propagación de ondas S y P medida perpendicularmente a los planos mano mala, mano buena y ley. Índice de anisotropía total (dM) y anisotropía relativa (dm)

plano	V_p (m/s)	V_s (m/s)	dM (%)	dm (%)
MM	4737 ± 37	2849 ± 71	13	4.8
MB	4519 ± 171	2951 ± 42		
L	4029 ± 229	2793 ± 33		

Módulos elásticos

Los módulos mecánicos pueden ayudar a identificarlos planos de corte (Mano mala, mano buena and ley), con relación a los microfisuras en el interior de las muestras, invisibles en la

superficie, (Moses et al., 2014). La tabla 7 presenta los valores de los módulos dinámicos (Sousa, 2014) en cada una de las orientaciones de corte.

Tabla 7. Módulos estáticos obtenidos con los valores de velocidad de propagación de ondas de ultrasonido

EJE	Módulo de Young (Mpa)	Relacion de Poisson	Módulo de cizalla G (MPa)	Módulo de Bulk K Nt/m ²
MM	52694	0.22	21 656	30 993536135
MB	52428	0.13	23 234	54 484191148
L	43183	0.04	20 813	43 309219788

El módulo de Young es muy similar para la dirección MM y MB, mientras que en la dirección L es un 18% menor.

Absorción de agua por capilaridad

El coeficiente de absorción capilar del granito estudiado es bajo, aunque se observó mayor en la dirección de las microfisuras de descompresión. Las diferencias entre los valores de este coeficiente han sido importantes, especialmente cuando la entrada de agua está influenciada por la presencia de microfisuras planas que facilitan la succión y la circulación dentro de la roca, como son las microfisuras de descompresión.

La figura 8 muestra la evolución de la absorción de agua para los planos, L, MB y MM. Como regla general, el eje paralelo a las microfisuras de descompresión tienen el mayor coeficiente de capilaridad.

La curva de absorción capilar de la gráfica de la figura 8 representa el incremento de peso por superficie en función de la raíz cuadrada del tiempo.

$\Delta M/S$, siendo:

$$\Delta M_i \text{ (g/cm}^2\text{)} = (M_i - M_o) / S$$

Donde M_i es el peso en el tiempo t_i , M_o el peso seco y S la superficie de absorción.

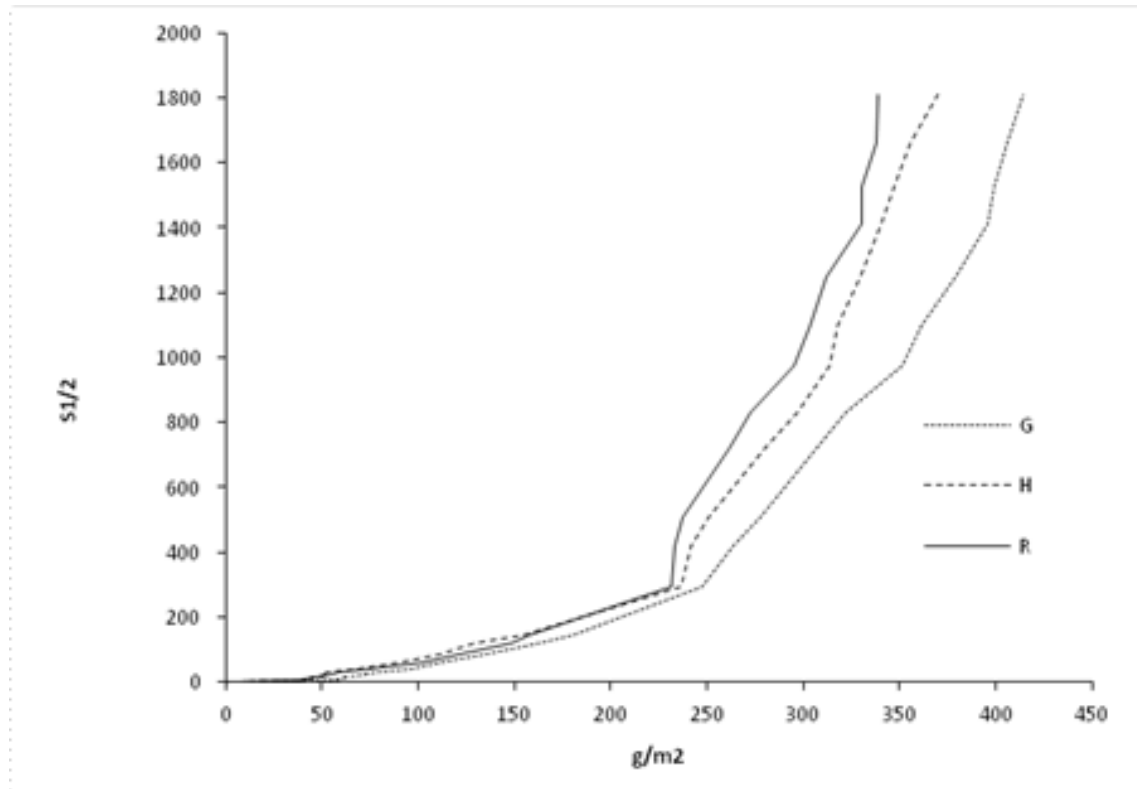


Fig. 8. Evolución del coeficiente de capilaridad para dada uno de las orientaciones de las probetas. R: dirección de Ley, G: dirección de mano buena. H: dirección de mano mala.

Permeabilidad al aire

La permeabilidad al aire está condicionada por la distribución de las microfisuras en el granito y tiende a aumentar en sistemas con predominio de microfisuras, que favorecen la permeabilidad, que es mayor a lo largo de los planos en la dirección de la ley.

Los valores obtenidos de permeabilidad al aire han sido muy bajos, casi despreciables para el plano de ley (0,4 milidarcin y mayores para los planos de mano mala (2,5) y mano buena (2,2).

Los valores se pueden observar en la tabla 8.

4. DISCUSIÓN

Como se ha reflejado en este artículo, existen muchas nomenclaturas para definir las microfisuras de descompresión. La definición de Ley en rocas graníticas según la ABNT NBR, 15012, 2013 como una orientación casi imperceptible en piedras caballeras, en macizo y en bloques, en el que el corte se logra más fácilmente en el proceso de extracción, al igual que Lin y Takahashi, 2008, que define ley, mano buena, y mano mala, como los planos a lo largo de los cuales las rocas se se dividen con facilidad. Esta facilidad de división no se debe siempre a las microfisuras de descompresión, si no que puede ser debido a otro tipo de mecanismos.

Røyne et al., 2008 y Anderson et al., 2004 indican que el control del deterioro en granito es debido a causas físicas y químicas. Fletcher et al. (2006) publicaron el primer modelo cuantitativo que relaciona meteorización química y física con los procesos de deterioro. Dana (1896) indica que los patrones esferoidales de deterioro en bolos graníticos son causados por cambios químicos y Larsen (1948) atribuye el deterioro esferoidal del granito a una ligera expansión de biotita y otros minerales causadas por hidratación; mientras que Chapman y Greenfield (1949) lo atribuyen al resultado de la oxidación e hidratación de minerales de silicato, basado en observaciones microscópicas.

La variación en las propiedades mecánicas del granito se explica por aspectos microestructurales (Vasconcelos et al., 2008, 2009), por lo que la orientación de la microestructura del granito cobra gran importancia en su deterioro. Lin y Takahashi, 2008 llevó a cabo observaciones microscópicas de las fisuras en granitos inducidas por descompresión. Las fisuras de descompresión son aproximadamente perpendiculares al esfuerzo de tracción.

La resistencia a la rotura a lo largo del plano de ley es significativamente menor que en las otras dos direcciones. Esto es debido a que la distribución de microfisuras preexistentes no es aleatoria sino que tiene una dirección definida por la dirección de descompresión. Es decir, hay

más microfisuras paralelas o casi paralelas en el plano de ley que a los otros planos (mano buena y mano mala).

Las fisuras de descompresión suelen ser intracristalinas y no intercristalinas, es decir, se propagan preferentemente a través de granos minerales y de límites de grano que están orientados perpendiculares a la dirección de descompresión. Sin embargo, cuando estos límites son rectos y paralelos al plano de ley, las fisuras intercristalinas serán más susceptibles de generarse. En cambio, cuando los límites de cristales son sinuosos, las microfisuras de descompresión encontrarán mayor resistencia para su propagación intercristalina, debido a que las microfisuras de descompresión tienden a propagarse de forma recta y perpendicular a la dirección de descompresión.

En el cuarzo suelen ser perpendiculares a la dirección de descompresión. En feldespatos puede haber además un control microestructural y en las plagioclasas, con centros alterados a serizita, desarrollan una propagación de microfisuras de descompresión distinta, debido a su comportamiento más plástico. Cuando los planos de exfoliación de las biotitas son paralelos al esfuerzo distensivo, se abrirán más fácilmente.

El tipo de cantera de donde se han extraído sillares históricos de granito que forman parte de muros y zócalos, va a determinar el tipo de deterioro. Generalmente los sillares extraídos de zonas superficiales y bolos graníticos subaéreos se caracterizan por tener microfisuras de descompresión pseudoconcéntricas y una alteración en forma curva, de piel de cebolla. A medida que las canteras se van profundizando, con el paso de los siglos, la piedra de construcción extraída estará menos alterada y con microfisuras de descompresión planas y paralelas a la superficie del paleorrelieve de la cantera.

Los canteros deben aprovechar la baja anisotropía del granito para realizar el corte natural, por lo que utilizan la coalescencia de microfisuras para cortar los bloques de granito.

En los sillares de granito se produce deterioro debido a que las fisuras de descompresión y paramento están en planos paralelos. Es decir, perpendiculares al suelo, por lo que el ascenso

hídrico actúa de forma más severa. Por el contrario, en losas de solado utilizadas en patrimonio no es frecuente ver este tipo de deterioro, ya que en este caso, las microfisuras de descompresión son paralelas a la superficie, y funcionan como obstáculos al ascenso capilar haciendo más difícil el ascenso capilar.

La labra del granito puede producir la coalescencia de microfisuras de descompresión creando planos con fisuras abiertas, lo que explica que el deterioro se produzca frecuentemente en los sillares inferiores de los edificios en donde los procesos de absorción de agua capilar favorecen el deterioro de los materiales por acción de cristalización de sales o heladicidad (Freire-Lista et al 2015b).

Chigira, M., 2001 ha estudiado el efecto de la meteorización sobre la estabilidad de laderas de granito muy afectadas por microfisuras de descompresión. Es decir, investigó el mecanismo de meteorización de granito, que produce desprendimientos. A pesar de los muchos trabajos realizados sobre anisotropía de los planos de corte (Jessell et al., 1995; Zhou et al., 2004) y deterioro en granito de construcción, hasta el momento no se han relacionado las microfisuras de descompresión con el deterioro tipo desplazado del granito, cuyo efecto en las propiedades petrofísicas y en la durabilidad de este material de construcción es esencial. Por lo que para investigar el deterioro en sillares históricos, se debe saber qué planos anisotrópicos han sido los tallados y cómo se dispone esta dirección en los sillares pertenecientes a edificios patrimoniales.

La microrugosidad observada en esta tesis en los tres planos de corte ha determinado que el plano de fractura paralelo a la ley es el más liso, seguido del plano de fractura paralelo al plano de mano buena, y el de mayor rugosidad es el plano de mano mala, Fujii et al., 2007 obtienen los resultados coherentes con este estudio utilizando una técnica fotogramétrica digital. Este hecho se explica debido a que las fracturas de distensión, se propagan rectas y perpendiculares a la dirección de distensión. Es por esta razón que los canteros tradicionales han identificado los planos de corte por el tacto. Según los canteros de la Sierra de Madrid, la ley es mejor cuanto más claro es el color de roca y más fino y duro el grano, lo que significa que predomina el cuarzo, ya que se obtienen mejores resultados con menos trabajo. Estos canteros han elegido el

plano de ley como paramento por ser más fácil de labrar y generar una superficie con gran planitud. Cuanto mayor es la rugosidad superficial, mayor es la superficie específica y la interacción con agentes de deterioro, por lo que una menor resistencia a la intemperie. Una superficie más rugosa es mucho más propensa a la colonización microbiana (Miller et al., 2012) o al agua y retención de suciedad.

La aplicación de tratamientos de conservación (Perez Ema 2010, Vazquez-Calvo et al., 2012, Alvarez de Buergo et al., 2013) debe tener muy presente la dirección de las microfisuras de descompresión.

Lin, 2002 ha utilizado una técnicas de análisis similares a las utilizadas en esta tesis y observó resultados similares. Los resultados de la microdureza han sido obtenidos a partir de piedra fresca, sin procesos de alteración en los planos, aspecto que no necesariamente ocurrirá en sillares de monumentos en donde los procesos de alteración se han generado una debilidad en la superficie de la piedra.

Los valores de V_p obtenidos por Lin, 2002, en un granito sano con características similares al granito de Alpedrete indican que el menor valor de V_p es el plano de ley, o las microfisuras de descompresión causan un descenso de V_p . Por otro lado, Takemura et al., 2003 y Takemura y Oda, 2004 estudian los planos de corte de un granito con el fin de averiguar cómo influyen las microfisuras abiertas en la anisotropía del granito, mediante la velocidad de ondas de ultrasonido y ensayos de compresión uniaxial, y observa que la anisotropía es causado por microfisuras abiertas preexistentes, no por microfisuras cementadas preexistentes.

Debido a que la V_p es menor en la dirección perpendicular al plano de ley, la puesta en obra de granitos en fachada de edificios debe tener una orientación con el plano de ley paralelo a la superficie del terreno para aumentar su durabilidad, ya que en esta posición la resistencia mecánica aumenta y la absorción capilar será menor, aunque su resistencia a la absorción de agua procedente de la lluvia sobre fachada será menor, este hecho es mucho menos agresivo que la entrada de agua por succión capilar desde el suelo debido a la presencia de sales.

Los datos obtenidos en este trabajo sobre permeabilidad al aire están fuera de rango. El equipo con el que se ha medido la permeabilidad al aire mide valores de permeabilidad desde 0,1 mD a 10 Darcy (Filomena et al., 2014), la baja permeabilidad del granito ha provocado que el ensayo durase varias horas. Es decir una permeabilidad muy baja. Si bien los datos obtenidos han sido coherentes con los resultados obtenidos por otros análisis.

La baja permeabilidad al aire del granito indican una muy buena resistencia a proceso de deterioro por contaminación atmosférica ya que la penetración de aire contaminado será bajo y solo afecta a zonas superficiales de la piedra, siempre que se pongan en plano MM que es la de menor permeabilidad ya que colocándose en otra disposición aumenta permeabilidad y con ello se incrementa el deterioro por contaminación atmosférica.

En los ensayos de envejecimiento acelerado sobre granitos (Freire-Lista, et al., 2015a, Freire-Lista, et al., 2015c) se ha demostrado que las fracturas preexistentes desarrollan un papel fundamental en el deterioro debido al envejecimiento por ciclos de hielo y deshielo o choque térmico. Es por ello importante tener en cuenta la orientación de las microfisuras de descompresión, tanto en sillares antiguos frecuentemente orientados según estas microfisuras o en placas modernas.

Bromblet et al., 1996 indica que la porosidad total, la porosidad por intrusión de Hg, la cinética de absorción capilar de agua, la cinética de evaporación, permeabilidad al aire, y conductividad del vapor de agua son los factores petrofísicos que determinan el proceso de desplacado y también el origen de la mejor durabilidad de piedras cristalinas con menor tamaño de cristal. Pero no menciona la relación que tienen las fracturas de descompresión con los desplacados.

Con técnicas microscópicas y análisis petrofísicos se ha demostrado que las microfisuras de descompresión juegan un importante papel en la anisotropía del granito, por lo que los procesos físico, químicos y biológicos actúan de distinto modo con relación a la orientación de las microfisuras de descompresión produciendo deterioro.

5. CONCLUSIONES

-La principal característica petrológicas que determinan la ley, mano mala y mano buena en un sillar del granito de Alpedrete cortado de forma tradicional, es la disposición de las microfisuras de descompresión.

-El plano de ley tiene gran cantidad de microfisuras intercristalinas, mientras que en los planos de mano buena y mano mala, las microfisuras son mayoritariamente intracristalinas

-El plano más susceptible de formar el paramento de sillares históricos sigue en general la dirección de las microfisuras de descompresión ya que es el más fácil y rápido de labrar.

-Antes de colocar los sillares en la fachada, deben ser identificados las microfisuras de descompresión.

- La orientación con respecto a las microfisuras de descompresión, en la que se coloque un granito de construcción es fundamental con respecto a su deterioro.

-Para entender del deterioro en sillares y esculturas labradas en rocas cristalinas es esencial el estudio de la orientación y distribución de las microfisuras de descompresión que siguen una orientación determinada por la posición de la piedra en la cantera.

-La V_p , V_s , permeabilidad al aire y ascenso capilar a lo largo de los planos de microfisuras de descompresión (Ley) son mayores que en las direcciones perpendiculares a estas microfisuras (mano buena y mano mala).

-El ascenso capilaridad es mayor en la superficie paralela a las microfisuras de descompresión, será la zona más susceptible al deterioro y en donde el tratamiento penetrará menos debido a la baja capilaridad de la dirección perpendicular a esta superficie.

-La aplicación de tratamientos de conservación en esculturas o sillares debe atender a la dirección de las microfisuras de descompresión.

-Cuando una dimensión de un bloque de granito es mayor que las otras (dinteles patrimoniales o placas actuales de revestimiento) se deben cortar y colocar de acuerdo con las microfisuras de descompresión para evitar su rotura.

REFERENCIAS

ABNT NBR, 15012, 2013. (Brazilian Standard) Rochas para revestimentos de edificações-terminologia. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/CEE-187 Rochas Ornamentais.

Anders, M.H, Laubach, S.E., Scholz, C.H., 2014. Microfractures: A review. *Journal of Structural Geology*, 69: 377-394.

Bahat, D., Grossenbacher, K., Karasaki, K., 1999. Mechanism of exfoliation joint formation in granitic rocks, Yosemite National Park. *Journal of Structural Geology*, 21: 85-96.

Benkó, Z., Molnár, F., Lespinasse, M., Váczi, T., 2014. Evidence for exhumation of a granite intrusion in a regional extensional stress regime based on coupled microstructural and fluid inclusion plane studies e An example from the Velence Mts., Hungary. *Journal of Structural Geology* 65: 44-58.

Bromblet, P., Bernabé, E., y Vergès-Belmin, V., 1996. Petrophysical investigation on the origin of scaling of a microgranular magmatic rock associated to granite in the monuments from Brittany (France)-Environmental Protection and Conservation of the European Cultural Heritage- Degradation and Conservation of Granitic Rocks, European Commission pp. 73-78.

Catlos, E., Baker, C., Sorensen, S., Jacob, L., Çemen, I., 2011. Linking microfisuras and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: Evidence from the Salihli and Turgutlu plutons in western Turkey (Menderes Massif). *Journal of Structural Geology* 33: 951-969.

Chen, Y., Nishiyama, T., Kusuda, H., Kita, H., y Sato, T., 1999. Correlation between microcrack distribution patterns and granitic rock splitting planes. *Int. J. Rock Mech. Min.* 36: 535-541.

Chigira, M., 2001. Micro-sheeting of granite and its relationship with landsliding specifically after the heavy rainstorm in June 1999, Hiroshima Prefecture, Japan. *Engineering Geology*, 59: 219-231.

De Vicente, G., Vegas, R., Muñoz Martín, A., Silva, P.G., Andriessen, P., Cloetingh, S., González Casado, J.M., Van Wees, J.D., Álvarez, J., Carbó, A. y Olaiz, A., 2007. Cenozoic thick-skinned deformation and topography evolution of the Spanish Central System. *Global and Planetary Change* 58: 335-381.

Christaras, B., Auger, F. y Mosse, E., 1994. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods. *Materials and Structures* 27: 222-228.

Dresen, G., Guéguen, Y., 2004. Damage and rock physical properties. In: Guéguen, Y., Dresen, G. (Eds.), *Mechanics of Fluid-Saturated Rocks*. Academic Press, Burlington, 169-217 pp.

- Filomena, C. M. Hornung, J. y Stollhofen, H., 2014. Assessing accuracy of gas-driven permeability measurements: a comparative study of diverse Hassler-cell and probe permeameter devices. *Solid Earth*, 5: 1-11, doi:10.5194/se-5-1-2014.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., Varas M.J., 2010, Characterisation of monzogranitic batholiths as a supply source for heritage construction in the northwest of Madrid: *Engineering Geology*, 115: 149-157.
- Fort, R., Varas M J, Alvarez de Buergo, M. and Freire-Lista, D.M., 2011, Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone: *Journal of Geophysics and Engineering*, 8: 132-144.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., 2013a, Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 61: 296-305.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M., Varas-Muriel, M.J. y Freire-Lista, D.M., 2013b, Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46: 421-429.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015a. Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology*. 113: 40-51.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015b. Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation. *Episodes*, 38 (2):106-113
- Freire-Lista D.M, Gomez-Villalba LS, Fort R.2015c. Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes. *Periodico di mineralogía*. (in press)
- Fujii, Y., Takahashi, M., y Hori, S., 2007. Three-dimensional topography of fracture surfaces obtained by a digital photogrammetric technique. *International Journal of the JCRM*. 3 (1): 31-36.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J, Fort R., 2008. Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty *Environ Geol* 56:547-560.
- Gómez-Heras, M., McCabe, S., Smith, B.J., Fort, R., 2009. Impacts of Fire on Stone-Built Heritage: an Overview. *Journal of Architectural Conservation* 15 (2):47-58.
- Gorbatsevich, F.F., 2003, Decompaction mechanism of deep crystalline rocks under stress relief. *Tectonophysics* 370: 121-128.
- Gumiel, P, Monteserín, V. Ferrero, A. Bellido, F, Baltuille, J.M., Vivar, V., 2006. Aplicación del análisis geométrico de fracturas a la determinación de bloques en las canteras de granito de O Porriño, Pontevedra (NO España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19: 1-2.
- Guydader, J. y Denis A., 1986. Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte ´évaluation de la qualité des schistes ardoisiers *Bull. Eng. Geol.* 33: 49-55.
- Hamdi, E., Bouden Romdhane, N., du Mouza, J., Le Cléac'h, J.M., 2008. Fragmentation energy in rock blasting. *Geotech. Geol. Eng.* 26: 133-146.
- Hamdi, E., Bouden Romdhane, N., Le Cléac'h, J.M., 2011. A tensile damage model for rocks: application to blast induced damage assessment. *Comput. Geotech.* 38: 133-141.

- Hamdi E, Lafhaj Z, 2013. Microcracking based rock classification using ultrasonic and porosity parameters and multivariate analysis methods. *Engineering Geology*. 167: 27-36.
- Holzhausen, G.R., 1989. Origin of sheet structure, 1. Morphology and boundary conditions. *Engineering Geology* 27: 225-278.
- DIN EN ISO: 4287. International Organization for Standardization. Surface roughness-terminology: Part 1. Surface and its parameters.
- Jessell, M.W., Cox, S.J.D., Schwarze, P., Power, W.L., 1995, The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique, *Special Publication of Geological Society, London*. 92: 27-37.
- Lin, W., 2002. Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite. *Journal of geophysical research*, 107 (B10): 2215, doi:10.1029/2001JB000648
- Lin, W., Takahashi, M., 2008. Anisotropy of strength and deformation of Inada granite under uniaxial tension. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 27 (12): 2463-2472.
- Menduiña, J., Fort, R. (coordinadores), 2005, Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX. IGME-IGE, Madrid, pp.131.
- Migoñ, P., Vieira G., 2014. Granite geomorphology and its geological controls, Serra da Estrela, Portugal. *Geomorphology*. 226: 1,14
- Miller, A.Z., Rogerio-Candelera, M.A., Dionisio, A., Macedo, M. F., Saiz-Jimenez, C. 2012. Evaluación de la influencia de la rugosidad superficial sobre la colonización epilítica de calizas mediante técnicas sin contacto, *Materiales de Construcción*, 62 (307): 411-424.
- Moses, C., Robinson, D. y Barlow, J., 2014. Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review. *Earth-Science Reviews* 135: 141-161.
- Nadan, B.J., Engelder, T., 2009. Microfisuras in New England granitoids: a record of thermoelastic relaxation during exhumation of intracontinental crust. *Geological Society of America Bulletin* 121: 80-99.
- Nara, Y., Kaneko, K., 2006. Sub-critical crack growth in anisotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 43: 437-453.
- Leith, K., 2012. Stress development and geomechanical controls on the geomorphic evolution of alpine valleys. (Ph.D. Thesis) ETH Zurich, Switzerland, 156 pp.
- Ollier, C., Pain, C. The origin of mountains. ISBN 0-203-00590-2: Routledge; 368
- Osborne, F.F. Rift, grain, and hardway in some pre-Cambrian granites, Quebec. *Economic Geology*, 1935, 30(5) : 540-551.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Perez Ema, N., Alvarez de Buergo, M. Bustamante, R., 2013. Integrated studies for the evaluation of conservation treatments on building materials from archaeological sites. Application to the case of Mérida (Spain). *International Journal of Conservation Science* 4: 693-700.

- Porsani, J.L., Sauck, W.A, Júnior AO.S.2006. GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*. 58: 177-187
- Sevillano, A., Gutierrez-Alonso, G., Gross, MR., 2001. Geometry and temporal development of a joint system in the tiasic nocks of the Iberian Range-Spanish Central System boundary. *Geogaceta*. 29: 127-130.
- Shadmon, A., 1989, *Stone, an introduction*. Intermediate Technology Publications. 140 pp.
- Sousa, L.M.O., 2014. Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. *Bull Eng Geol Environ*. 73: 569-588.
- Takemura, T., Golshani, A., Oda, M., Suzuki, K. 2003. Preferred orientations of open microfissuras in granite and their relation with anisotropic elasticity. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40: 443-454.
- Takemura, T., Oda, M., 2004. Stereology-based fabric analysis of microfissuras in damaged granite. *Tectonophysics* 387:131-150.
- Thuro, K. y Scholz, M., 2004. Deep weathering and alteration in granites-A product of coupled processes. *GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H.M-C Processes in Geosystems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications*. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- UNE-EN, 1925, 1999. Natural stone test method. Determination of water absorption coefficient by capillarity, 13pp.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S. y Pamplona, J. 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*. 48: 453-466.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S. y Pamplona, J., 2009. Compressive Behavior of Granite: Experimental Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(9), 502-511.
- Vazquez-Calvo, C., Alvarez de Buergo, M., Fort, R. Varas-Muriel, M.J., 2012. The measurement of surface roughness to determine the suitability of different methods for stone cleaning. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(4), 108-117.
- Villaseca, C., Barbero, L., Rogers, G., 1998, Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints: *Lithos*, 43:55-79.
- Villaseca, C., Herreros, V., 2000, A sustained felsic magmatic system: the Hercynian granitic batholith of the Spanish Central System: *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 91: 207-219.
- Villaseca, C., Bellido, F., Perez-Soba, C., Billstrom, K., 2009, Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt: *Mineralogy and Petrology*, 96: 197-211.
- Villaseca, C., Orejana, D., Belousova, E.A., 2012, Recycled metaigneous crustal sources for S- and I-type Variscan granitoids from the Spanish Central System batholith: Constraints from Hf isotope zircon composition: *Lithos*, 153:84-93.
- Yin, P., Wong, Chau, K.T. 2014. Coalescence of two parallel pre-existing surface cracks in granite. *International Journal of Rock Mechanics & r Sciences*, 686:6-84.

Zhou, H.W., Xie, H., 2004, Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis, *Physics Letters, A*, 325: 355-362.

Ziegler, M, Loew, S., Moore, J.R., 2013. Distribution and inferred age of exfoliation joins in the Aar Granite of the central Swiss Alps and relationship to Quaternary landscape evolution. *Geomorphology*, 201:344-362.

Ziegler M, Loew, S., Bahat, D., 2014. Growth of exfoliation joins and near-surface stress orientations inferred from fractographic markings observed in the upper Aar valley (Swiss Alps). *Tectonophysics*, 626, 1-20.

6.7 Origen y evolución de desplazados y descamados en el granito de la Plaza Mayor de Madrid

Libro de Actas del Congreso del Congreso Nacional: Estudio y Conservación del Patrimonio Cultural - 2015 (ECPC - 2015), Organizado por TECHNOHERITAGE y la Universidad de Málaga. Málaga, 16-19 Noviembre 2015.

Freire-Lista, D.M. y Fort, R.

La microfisuración está directamente relacionada con patologías que se observan en edificios patrimoniales contruidos con granito. Las microfisuras del granito de construcción son debidas a varias causas, como la evolución geológica del plutón o el proceso de extracción y labra, además de las debidas al uso o avatares de la propia construcción de la que forman parte.

La Plaza Mayor de Madrid (España) está contruida con columnas de granito que han sufrido a lo largo de la historia numerosos daños. La cartografía de los sillares de granito del fuste de cuatro columnas ha puesto de relevancia la existencia de una mayor densidad de desplazados en su parte inferior, con un espesor inferior a 4 mm.

Las observaciones microscópicas han constatado una disposición vertical de las microfisuras en las columnas de granito. Estas microfisuras generan una anisotropía en los sillares de granitos que influye decisivamente en su deterioro.

Uno de los logros de este trabajo ha sido determinar que las microfisuras de descompresión están ligadas al deterioro por desplazado de sillares históricos de granito. Estas microfisuras al ser abujardas coalescen permitiendo que agentes, como agua capilar, ascienda por ellas y se generen los desplazados.

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE DESPLACADOS Y DESCAMADOS EN EL GRANITO DE LA PLAZA MAYOR DE MADRID

D.M. Freire-Lista^(1, 2), **R. Fort**^(1, 2)

(1) *Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), Madrid, España*

(2) *CEI Campus Moncloa, UCM-UPM y CSIC. Calle José Antonio Novais, 12. 28040
Madrid, España (d.freire@igeo.ucm-csic.es, rafael.fort@csic.es)*

Las microfisuras están directamente relacionadas con patologías de edificios construidos con granito. Las microfisuras del granito son debidas a varias causas, como a la evolución geológica del plutón, a la extracción y labra además de las debidas al uso o avatares de la propia construcción de la que forman parte.

La Plaza Mayor de Madrid (España) conserva columnas de granito que han sufrido a lo largo de la historia gran cantidad de daños. La cartografía de los sillares de granito del fuste de cuatro columnas ha puesto de relevancia mayor densidad de desplazados en su parte inferior, con un espesor menor de 4 mm.

Las observaciones microscópicas han constatado una disposición vertical de las microfisuras en las columnas de granito. Estas microfisuras generan una anisotropía en los sillares de granitos que influye en su deterioro.

PALABRAS CLAVE: Fisuras, Piedra Berroqueña, deterioro, Global Heritage Stone.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la Humanidad, todas las grandes civilizaciones han construido templos, palacios, iglesias, murallas, monolitos y casas tallando sillares de granito. Estos sillares suelen sufrir deterioros, concretamente desplazados y descamados.

Los granitos de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español), denominados piedra berroqueña, han sido un material de construcción muy utilizado en fachadas, muros o zócalos de edificios, bases de grandes estructuras o pedestales de estatuas [1]. La colocación de la piedra en los edificios en base a su anisotropía [2] definirá el comportamiento mecánico y durabilidad ante procesos de deterioro, especialmente cuando están sujetas a cambios de temperatura [3, 4, 5] y existe presencia de agua o sales.

El objetivo de este estudio es la identificación del deterioro en columnas de granito de la Plaza Mayor de Madrid comparándolas con el granito fresco de la zona de procedencia que corresponde al granito de Alpedrete [1]. Esta piedra ha sido ampliamente utilizada como material de construcción en sillares y esculturas de edificios históricos [6] por sus características petrofísicas y de durabilidad. También por su estética, homogeneidad y posibilidad de distintos acabados.

La cartografía detallada de los sillares permite la identificación del deterioro y determinar su distribución espacial en la superficie del sillar, mientras que la comparación microscópica entre láminas delgadas de granito extraído de sillares y de cantera histórica, permite establecer los mecanismos de deterioro del granito. Las microfisuras [7] en sillares de monumentos tienen gran importancia, ya que pueden funcionar como vías de entrada de agentes de deterioro como agua o sales [2].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Alpedrete es un monzogranito de tamaño de cristal medio, hipidiomórfico, equigranular y ha sido utilizado en la construcción de importantes edificios históricos de Madrid. Este granito de construcción ha sido nominado como Global Heritage Stone Resource [8, 9] por su importancia en el patrimonio tangible e intangible de la Comunidad de Madrid.

Se han seleccionado muestras de granito fresco orientadas según los planos de corte en una cantera de Alpedrete (40°39'45.1"N 4°00'49.8"W) para la elaboración de láminas delgadas de $30 \times 20 \pm 3$ mm y 30 μ m de espesor a baja velocidad de corte (120 rpm) para minimizar la generación de fisuras. También se han estudiado láminas delgadas orientadas de acuerdo a las caras de cuatro sillares de las columnas que forman los soportales de la Plaza Mayor de Madrid. Estas láminas se han impregnado con fluoresceína. La petrografía se ha estudiado mediante observación microscópica (microscopía petrográfica-PM) con un microscopio de luz polarizada Olympus BX 51 (PM) equipado con una cámara fotográfica DP 12 (6 V/2.5 Å) y software Olympus DP-Soft (version 3.2). Las microfisuras se han caracterizado con el mismo equipo, utilizando un microscopio de fluorescencia con lámpara de mercurio Olympus U-RF-T.

La cartografía de los sillares inferiores del fuste de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid se ha realizado fotografiando cada una de las cuatro caras de las columnas seleccionadas y in situ, sobre estas fotografías se cartografiaron, in situ (Plaza Mayor) los desplazados de las cuatro caras de las 70 columnas ortoédricas que componen los soportales de la Plaza Mayor. Una vez realizada la cartografía del deterioro, se ha calculado el área que ocupan los desplazados en el sillar con el software JMicrovision versión 1.2.7.

3. RESULTADOS

La cartografía del deterioro en el fuste de cuatro columnas de granito de la Plaza Mayor de Madrid indica que los desplazados se localizan en la parte inferior de los sillares (Fig. 1). Estos desplazados tienen un espesor de hasta 4 mm y ocupan un 4,45 % de la superficie total del sillar. Si tenemos en cuenta la superficie con escamado este valor de deterioro asciende al 19,23 %.

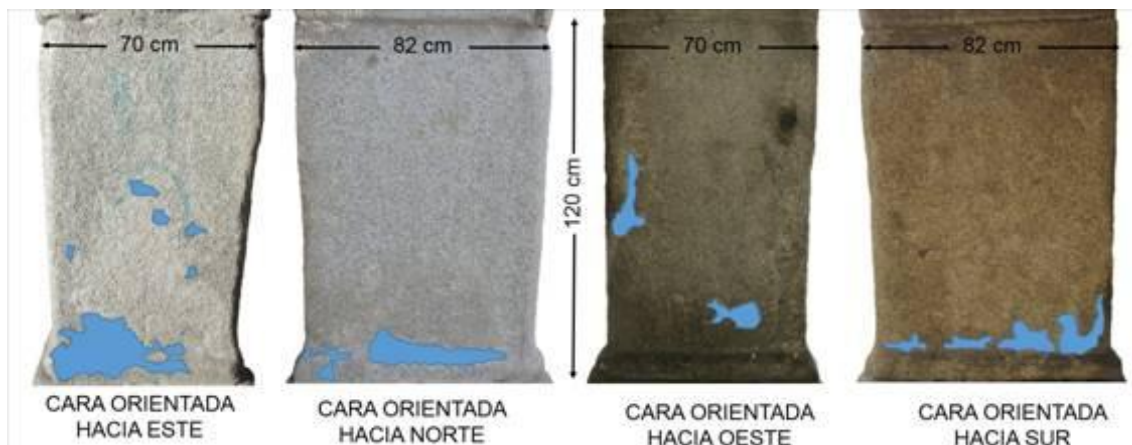


Figura 1. Cartografía de los desplazados en las caras del primer sillar del fuste de una columna de la Plaza Mayor de Madrid.

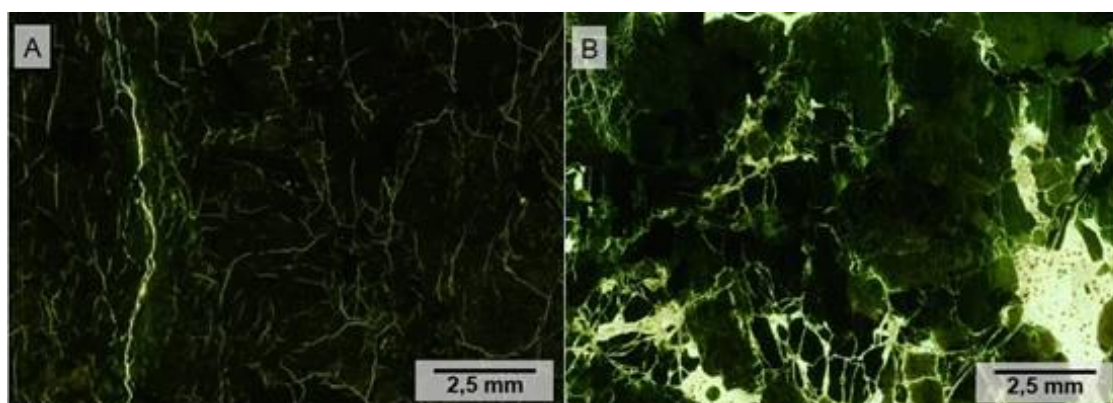


Figura 2. Micrografía del granito de Alpedrete. A. Con microscopía de fluorescencia, extraído de cantera histórica. B. Micrografía con microscopía de fluorescencia del granito, extraído de sillar del fuste de la columna de la Plaza Mayor de Madrid.

La comparación microscópica de fracturas entre láminas delgadas de muestras extraídas en cantera histórica y de los sillares de granito de la Plaza Mayor de Madrid ha permitido observar un importante aumento en la anchura de las fisuras (Fig. 2). El porcentaje de volumen que ocupan las fisuras en el granito fresco es de 2,48 % mientras que las microfisuras de la superficie del sillar ocupan un 16,45%.

4. DISCUSIÓN

Los cambios térmicos sobre el granito generan un aumento de la densidad y grosor de las microfisuras [4,5]. Además la circulación de agua por capilaridad, cristalización de sales y

diversos daños sufridos por el uso de la Plaza Mayor de Madrid a lo largo de la historia favorece el desplazado que ha sufrido.

Los desplazados se producen con mayor frecuencia en la zona inferior de los sillares, esto puede ser debido al ascenso capilar favorecido por una disposición vertical de las fracturas observada en lámina delgada. La zona superficial de los sillares está muy afectada por microfisuras debidas a factores extrínsecos al granito de Alpedrete, como es la labra y golpes sufridos.

El agua y la polución en contacto con la superficie del granito será más penetrativa cuanto más microfisurado esté el granito. Las microfisuras funcionarán como vías que aceleran el deterioro químico de los minerales y del conjunto de la roca. Los feldespatos microfisurados son mucho más susceptibles al deterioro debido a la meteorización química, que forma minerales de arcilla en granitos [5].

La cristalización del agua en las microfisuras preexistentes y expansión térmica de minerales crea microfisuración en rocas graníticas que en su mayoría se propagan siguiendo planos microestructurales. Es decir, la microestructura de los feldespatos va a controlar en gran medida la propagación de microfisuras ya sea intercristalina o intracristalina, aprovechando defectos cristalográficos o microfisuras preexistentes [10,11].

Cuando las microfisuras intracristalinas se propagan en feldespatos siguiendo planos cristalográficos, lo hacen siguiendo los planos casi ortogonales de exfoliación o las maclas. Cuando las microfisuras intracristalinas de las plagioclasas se propagan siguiendo su zonación, generan microfisuras pseudoconcéntricas. Además las plagioclasas tienen maclas y exfoliación casi ortogonal, por lo que en estos planos también se propagarán microfisuras. El control microestructural es distinto para cada uno de los minerales constituyentes del granito [12].

La alteración hidrotermal ha producido que los núcleos de las plagioclasas estén seritizados estos núcleos son susceptibles de alojar agua que al congelarse crea tensiones y microfisuras produciendo deterioro. Las plagioclasas zonadas cuentan con mayor número de microfisuras en los núcleos debido a que sus centros más cálcicos son más susceptibles al deterioro [5].

Si se comparan las figuras 1 y 2 se puede observar cómo en el granito de cantera muchas de las microfisuras son intercrystalinas. En la Figura 2b se observa un considerable aumento de grosor de las microfisuras y una mayor proporción de microfisuras transcristalinas. La propagación de microfisuras en granitos no depende sólo de la mineralogía de la roca, sino también de las condiciones ambientales y del grado de interacción con fluidos.

El deterioro de un sillar está controlado por la porosidad primaria [13], la cual no afecta a todo el volumen de la roca por igual, siendo normalmente más elevado en la zona superficial, en el entorno donde accede el agua y cristaliza hielo, incrementando las microfisuras preexistentes o porosidad primaria del granito. El aumento del tamaño relativo de microfisuras puede encontrar su causa en la aparición de porosidad secundaria debida a los fenómenos de capilaridad y posterior hielo deshielo o cambios térmicos, sobre todo en la superficie del sillar debido a la expansión térmica de los minerales [14, 15].

Los sillares de granito de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid permiten ver una orientación en sus microfisuras, esta orientación es la responsable de la anisotropía [16] que presenta el granito de Alpedrete con respecto a la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido⁴. Esta lineación de las microfisuras contribuye a la generación de desplazados y escamados visibles en los sillares estudiados. Es decir, esta lineación se observa mejor en sillares alterados que sin deteriorar.

5. CONCLUSIONES

Para entender el deterioro en sillares y esculturas labradas en granito es esencial el estudio de la orientación y distribución de las microfisuras de descompresión que siguen una orientación determinada por la cantera. Las observaciones microscópicas han constatado una orientación preferencial vertical de las microfisuras en las columnas de granito de la Plaza Mayor de Madrid.

La superficie paralela a ellas, será la zona más susceptible de generar deterioro por desplazados y descamados. Estos planos de microfisuración ayudarán al ascenso capilar del agua y contribuirán al deterioro.

Los desplazados y descamados se producen con mayor frecuencia en la superficie inferior de los sillares y tienen un espesor de hasta 4 mm y ocupan un 4,45 % de la superficie total del sillar.

Las propiedades texturales entre el granito de la cantera y el de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid son distintas. Las microfisuras preexistentes se han ensanchado y se han creado otras nuevas microfisuras, principalmente de tipo intracristalinas y transcristalinas. El granito fresco de cantera histórica tiene un volumen de microfisuras del 2,48 % mientras que las microfisuras de la superficie del sillar ocupan un 16,45%.

Agradecimientos. Este trabajo fue financiado por la Comunidad de Madrid en el marco del programa GEOMATERIALS-2CM (S2013/MIT-2914). Los autores son miembros del Grupo de Investigación “Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio” (ref. 921349). Los análisis petrofísicos se realizaron en el Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), afiliado al Campus de Excelencia Internacional de Moncloa (UCM-UPM) y a la Red de Laboratorios del Patrimonio (RedLabPat).

REFERENCIAS

- 1 D. M. Freire-Lista, R. Fort, M. J. Varas-Muriel, Episodes. 2015, 38 (2), 106-113.
- 2 R. Fort, B. Fernández-Revuelta, M. J. Varas, M. Álvarez de Buergo, M. Taborda, Mater. Construcc. 2008, 58, 289-290, 161-177.
- 3 M. Gómez-Heras, B. J. Smith, R. Fort R. Environ. Geol. 2008, 56, 547-560.
- 4 D. M. Freire-Lista, R. Fort, M.J. Varas-Muriel, Cold Regions Science and Technology. 2015, 113, 40-51.
- 5 D. M. Freire-Lista, L.S. Gomez-Villalba, R. Fort, Periodico di mineralogía. 2015, in press.

- 6 R. Fort, M. Alvarez de Buergo, E. M. Perez-Monserrat, M. J. Varas. *Engineering Geology*. 2010, 115, 149-157.
- 7 M. H. Anders, S.E. Laubach, C. H. Scholz, *Journal of Structural Geology*. 2014, 69, 377-394.
- 8 B.J. Cooper, *Episodes*. 2010, 33(1), 38-41.
- 9 B.J. Cooper, B. R. Marker and I. A. Thomas., *Engineering Materials*. 2013, 548, 329-335.
- 10 T. Reuschlé, S. G., Haore, M. Darot, *Tectonophysics*. 2003, 370, 95-104.
- 11 T. Reuschlé, S. G. Haore, M. Darot, *Earth and Planetary Science Letters*. 2006, 243, 692-700.
- 12 M. J. Wilson. *Clay Minerals*. 2004, 39, 233-266.
- 13 A. C. Íñigo, M.A. Vicente, V. *Mechanics of Materials*. 2000, 32, 555-560.
- 14 O. Alm, L. L. Jaktlund and S. Kou. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1985, 40 (3), 161-179.
- 15 F. F. Gorbatshevich *Tectonophysics*, 2003, 370, 121-128.
- 16 R. Fort, M. J. Varas, M. Alvarez de Buergo and D. M. Freire-Lista, *Journal of Geophysics and Engineering*. 2011, 8, 132-144.

6.8 The piedra berroqueña region: candidacy for Global Heritage Stone Province status.

Geoscience Canada is the journal of the Geological Association of Canada (GAC).

Publicado online. <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/24198>

Freire-Lista, D.M. y Fort, R.

La región donde aflora la denominada piedra berroqueña, ubicada en la Sierra de Guadarrama del Sistema Central Español, ha aportado la mayoría de la roca granítica empleada en las construcciones de la Comunidad de Madrid y provincias colindantes. Los pueblos canteros de esta región han conservado la tradición del corte y labra del granito. Son muy abundantes las canteras históricas que forman parte del paisaje de la Sierra de Guadarrama. Del mismo modo, existen afloramientos y explotaciones con importantes reservas, que garantizan un suministro rápido de piedra dimensionada con distintos acabados.

La piedra berroqueña ha sido utilizada como piedra de construcción desde antes de la época romana. Sus características petrofísicas y elevada durabilidad han permitido que hayan llegado hasta nuestros días en buen estado de conservación edificios muy emblemáticos de la región, como el Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial (1563-1584), y el Palacio Real (1738-1764), la Puerta de Alcalá (1770-1778) o el Museo del Prado (1785-1808) en la ciudad de Madrid. Además, esta piedra se ha utilizado en la mayoría de los edificios y calles de la ciudad, así como en numerosos edificios más actuales construidos alrededor del mundo, como las terminales de los aeropuertos de Atenas y Cork o el consulado británico en Hong Kong.

Se presenta la provincia de la piedra berroqueña para su nominación como “Global Heritage Stone Province”. Además, se proporcionan las características petrográficas y petrofísicas de cinco tipos de granitos representativos de la Comunidad de Madrid. La región presenta numerosas canteras en las que se ha explotado un granito con características comunes, tales como coloraciones grises o presencia de enclaves con tendencia esferoidal/elíptica. Se aporta la localización de canteras históricas para el posible y futuro uso de su material en restauraciones de inmuebles históricos.

La provincia de piedra berroqueña cumple los requisitos propuestos para ser nominada como GHSP. Esta nominación contribuirá al mayor conocimiento y difusión de un área que apuesta por el aprovechamiento de la piedra berroqueña.

The Piedra Berroqueña region: candidacy for Global Heritage Stone Province status

D. M. Freire-Lista^{1,2*}, R. Fort^{1,2}.

(1) Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC – Complutense University of Madrid UCM. Madrid, Spain (d.freire@igeo.ucm-csic.es, rafael.fort@csic.es)

(2) CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid, Spain

*Corresponding author at: Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM), Calle José Antonio Novais, 12. 28040 Madrid. Tel.: +34 913944903. Fax: +34923219609.

E-mail address: d.freire@igeo.ucm-csic.es

SUMMARY

The Piedra Berroqueña region in the Guadarrama Mountains, part of Spain's Central Range, supplies most of the construction granite used in Madrid and surrounding provinces. The region's quarrying towns conserve their granite extraction and hewing traditions. Historic quarries form part of the landscape, as do current extraction sites with huge reserves that guarantee a speedy supply of variously finished dimension stone.

Piedra Berroqueña granite has been in use as a construction material since long before Roman times. Many emblematic monuments, including San Lorenzo Royal Monastery at El Escorial (1563-1584), Madrid's Royal Palace (1738-1764), the Alcalá Gate (1770-1778), the Prado Museum (1785-1808) and Puerta del Sol (one of Madrid's main squares) owe their good state of conservation to the stone's petrophysical characteristics and durability. This granite is also found on most of the city's housing and streets, as well as modern buildings the world over, such as the airport terminals at Athens and Cork and the British consulate at Hong Kong.

This paper supports the Piedra Berroqueña region's application for nomination as a Global Heritage Stone Province. It also discusses the petrographic and petrophysical properties of five representative granites that share many characteristics, including their

grey tones and the presence of approximately spheroid nodules. The location of historic quarries is shown for possible future use of the material in restoration works.

The Piedra Berroqueña region meets the requirements for nomination as a Global Heritage Stone Province, a distinction that would enhance public awareness of an area committed to quarrying and working the local stone.

INTRODUCTION

The Piedra Berroqueña region occupies an area of about 100 km long by 40 km wide, part of which lies in the Guadarrama Mountains National Park, in the eastern branch of Spain's Central Range. It runs southwest-northeast across the provinces of Madrid, Segovia and Ávila.

“Berroqueña” stone, a name that comes from the Spanish word “berrueco” or an outcrop of granite boulders, is the granite traditionally used in regional construction.

Many towns in the Guadarrama Mountains, particularly in the province of Madrid, engage in quarrying, hewing and shipping granite. The mainstay of the area's economy for centuries, its importance is mirrored in the stone-related etymology of some of the local place names: such as Alpedrete (stone in Spanish is *piedra*), Berrocal (in Spanish, a place where granite boulders outcrop) (Llorente, 2011), Moralarzal and Valdemorillo (based on the pre-Roman roots “mor(r)” or “mur(r)”, meaning a pile of stones).

Traditional quarrying in the towns forms part of the province of Madrid's intangible heritage, as attested to by the many festivals honouring St Peter, the monuments to and courses on the trade and quarrymen's competitions (Fig. 1).

Most of the 2 000 historic quarries in the province of Madrid are small and shallow because the stone was traditionally removed manually from the top of the outcrops (to depths of approximately 1-1.5 m). Whereas in the past, quarrying consisted of removing only whale-back formations (granite boulders) (Fig. 2a), more recently, with their gradual depletion, extraction has involved quarrying at greater depths (Fig. 2b). Today traditional family-run quarries co-exist with the mechanised variety (Fig. 2b). Piedra Berroqueña began to be used internationally in the twentieth century. By mid-century,

approximately 21 000 000 tonnes of Piedra Berroqueña had been removed from historic quarries and used as a construction material in Madrid (Martín, 1994). In 2011, 5 573 450 tonnes were exported (AIDICO, 2012). Cadalso de los Vidrios and Bustarviejo – La Cabrera are the two main quarrying areas presently in use. Their granite has been used in emblematic buildings the world over (Table 1). This stone, along with other materials (Fort, 2008), was used on key heritage buildings in the centre of the province (Table 1) and in nearly all the residential buildings in the capital city's historic quarters, as well as to make pavers, cobblestones, manhole lids and urban furniture (Martín, 1994).

Since Casiano de Prado y Vallo published his *Descripción Física y Geológica de la provincia de Madrid* (physical and geological description of the province of Madrid) in 1864, many scientific articles have appeared on Piedra Berroqueña: on its origin (Villaseca et al., 1998, 2009, 2012; Villaseca and Herreros, 2000), petrological (Gómez-Heras et al., 2008) and petrophysical (Fort et al., 2011, 2013a) characteristics; durability (Gómez-Heras, 2005; Fort et al., 2011; Freire-Lista et al., 2015a, 2015b, 2015c); and on the buildings for which it was used (López de Azcona et al., 2002; Fort González et al., 2004, Fort et al., 2010; Menduiña and Fort, 2005; Pérez Monserrat and Fort González., 2004).

The granitoid plutons of the Piedra Berroqueña region (Brandebourger, 1984) consist of Carboniferous-lower Permian, late- to post-orogenic monzogranite (De Vicente et al., 2007). Four major types of monzogranite occur: biotitic monzogranites with some cordierite, biotitic monzogranites with some amphibole, biotitic monzogranites with no cordierite or amphibole and leucogranites.

Monzogranite normally generates flat, braided, landscapes with boulders or tors. Leucogranites, with smaller grain size, form more rugged landscapes with subvertical fracturing, resulting in greater topographic relief.

Piedra Berroqueña monzogranites have mafic inclusions of essentially two types: xenoliths unrelated to granite magma (such as orthogneiss, metapelite or schist fragments) and igneous mafic microgranular nodules (Villaseca et al., 1998), for which

the region's quarrymen have a number of terms: *gabarros*, *negrones* or *manchones* (smooth-edged nodules, black spots, or stains).

Global Heritage Stone Province (GHSP) status for the Piedra Berroqueña region is proposed in light of its quarrying tradition and history and the use of its stone. It provides appropriate detail for GHSP assessment, describing the petrophysical and chemical properties of granite and the economic and cultural importance of quarrying this stone throughout history.

METHODOLOGY

Petrophysical data were compiled on five granites representative of historic or active quarries in the Piedra Berroqueña region that have been widely used in Madrid (Fort et al., 2013b). These included granites from Alpedrete (monzogranites with cordierite, Freire-Lista et al., 2015b), proposed as a Global Heritage Stone Resource (Cooper, 2010, 2013a, 2013b, Hughes et al., 2013); Cadalso de los Vidrios (leucogranite); La Cabrera (monzogranite with amphibole); Colmenar Viejo and Zarzalejo (monzogranites with no cordierite or amphibiotite) (Freire-Lista et al., 2015d), also it was proposed as a Global Heritage Stone Resource.

To quantify the decline in their petrophysical and strength values, they were exposed to freeze-thaw testing as specified in European standard (with 280 cycles) (UNE-EN 12371, 2001, Freire-Lista et al., 2015a).

HISTORIC USE OF PIEDRA BERROQUEÑA

The earliest artistic expressions in the Piedra Berroqueña region are found in a nook in the Aljibes caves (Priego, 1991), where granite walls serve as a substrate for paintings that date from 1500-1200 BCE. The Neolithic dolmen at Entretérminos (Losada, 1976) and the burial mound at Las Vegas de Samburriel (Gil, 2013) are other examples of the pre-Roman use of Piedra Berroqueña. The Romans used it to build a road from Cercedilla to Segovia, remains of which have been conserved, as well as bridges at Colmenar Viejo and a building at Collado Mediano, now an archaeological site. The

Colmenar Viejo Municipal District (Colmenarejo et al., 2005) hosts remains from the Visigoth period (fourth to eighth centuries).

The mountains in the Piedra Berroqueña region form a natural barrier that has been the site of a number of important battles. For centuries, it was a frontier that divided the Christian and Muslim kingdoms, respectively, to the north and south. In Muslim times, watchtowers were built in places such as El Berrueco and Buitrago de Lozoya. The latter town's historic centre was listed as a historic-artistic compound and its castle as a cultural heritage asset, both in 1993, while its walled enclosure has had national monument status since 1931.

It was not until the permanent conquest of Toledo by the Christians in 1085 that monastery-fortresses, churches and castles were built with Piedra Berroqueña. In the Middle Ages (seventh through fifteenth centuries), the materials used were the ones closest to population centres. In 1475, work began on the Manzanares el Real castle (listed as a historic-artistic monument in 1931) with local leucogranite. Pedraza's historic core, built with Piedra Berroqueña, has had monumental compound status since 1951. Madrid's designation as the capital of the Kingdom of Spain in 1561 and the construction of the Royal Monastery at El Escorial between 1563 and 1584 marked the beginning of the widespread use of Piedra Berroqueña throughout the region of Madrid (Fort et al., 2011).

In 1749 work was completed on a new paved road from the Guadarrama Mountains to Madrid. This improvement in communications increased the volume of granite shipments to the city. In the eighteenth century nearly all the inhabitants of the Piedra Berroqueña region engaged in quarrying or shipping the stone (Marqués de la Ensenada, 1752).

Royal architect Francisco Sabatini drafted a code that called for paving the streets of Madrid with Piedra Berroqueña, which was approved in 1761. The respective municipal ordinance enacted that same year generated a growing demand for this dimension stone. After the city's Plaza Mayor (main square) burned down for the third time in 1790, it was reconstructed with Piedra Berroqueña, which was also used to build the Prado Museum (1785-1808). The Battle of Somosierra, fought and lost in 1808 during the War of Independence against the French, cleared the way for Napoleon's troops to enter Madrid. A small fort built with Piedra Berroqueña on the battlefield has been conserved

and today is a cultural heritage asset. During the reign of Joseph (Bonaparte) I (1808-1813), and later, a town planning ordinance required all buildings to have a dado consisting of three rows of Piedra Berroqueña ashlar (Cabello y Lapiedra, 1901). The stone was also one of the materials used to build the network of optical telegraphic communication towers between Madrid and Burgos, undertaken in 1836 (Olivé, 1990).

A substantial number of Piedra Berroqueña quarries were opened in the mid-nineteenth century to build the Isabel II Canal that carries water from the Guadarrama Mountains to the city of Madrid. That project entailed the construction of a host of hydraulic infrastructures, such as the Amanié aqueduct, a neo-Gothic tower, the reservoir at Manzanares el Real (Unceta and Echenagusía, 2005) and bridges. Improvement works were also conducted on the road between the quarries and the capital city.

Oxen were used to carry construction granite from the Piedra Berroqueña region through to the twentieth century, albeit less and less commonly, for trains and later lorries were used starting in the nineteenth. To meet such high demand, an 11-km railway line operated for 73 years (1883-1956), exclusively to ship Alpedrete granite from the quarry to Collado Villalba station (Aranguren and López, 1990). Railways lowered the cost of shipping the material, just at the time when most of Madrid's quarters were being built and summer homes were going up in the mountains. The dados on Madrid's municipal slaughterhouse (1910-25) and bullfighting ring (1920-29) are made of Piedra Berroqueña.

When the Sociedad de Sacadores de Piedra de la Sierra (society of stone extractors) and the Sociedad Construcciones Hidráulicas y Civiles (hydraulic and civil construction society) were founded in 1914, Alpedrete region became the area's leading producer of Piedra Berroqueña. The harsh working conditions, in conjunction with the large number of workers engaging in quarrying Piedra Berroqueña, led to a strike in 1930 backed by over 1 000 quarrymen. The prevalence acquired by the Piedra Berroqueña region was symbolised by the 1932 unveiling of the Fountain of the Geologists, made of Piedra Berroqueña. The monument was a tribute to geologists Casiano del Prado, José Macpherson, Salvador Calderón and Francisco Quiroga, who had pioneered the study of this stone, fostered scientific research in the Guadarrama Mountains and placed the region on the cultural map.

The building christened as “los Nuevos Ministerios” (new ministries), one of Madrid’s largest, was erected with Piedra Berroqueña from 1931 to 1942 (Maure, 1985). While building construction, and with it work in the quarries, waned during the Spanish Civil War (1936-1939), the war itself left a considerable heritage of trenches, shelters, observatories and forts scattered across the region. Alpedrete granite resisted the ravages of war, although bullet holes are still visible on the ashlar in some of Madrid’s heritage buildings (Pérez-Monserrat et al., 2013) (Fig. 4f).

The granite quarried in 1940-50 was used to rebuild Madrid and erect the “Valle de los Caídos” (Valley of the Fallen) monument (Méndez, 2009). Beginning in 1960 output rose substantially to meet the city’s huge demand for granite for buildings such as the National Mint, finished in 1964.

The stone quarried today is used primarily in flooring (García del Cura et al., 2008), pavers and funerary art and for export and restoration and rehabilitation works in the region of Madrid. The key production centres are La Cabrera (LA), which markets its stone under the trade name Blanco Perla, and Cadalso de los Vidrios (CA), the home of Blanco Cristal.

The granite is also quarried at Zarzalejo (ZA) and trades under the name Blanco Rafaela, although output is much smaller. This stone was used to reconstruct Moncloa Palace (residence and office of the President of the Spanish Government), renovate the Royal Palace, build the entrance and buildings in the IFEMA fairgrounds and erect the Queen Sofia Museum, among others.

Historic Piedra Berroqueña quarries at Alpedrete (AL) and Zarzalejo (ZA) supplied the granites used in many heritage buildings (Table 1).

HERITAGE ISSUES:

Piedra Berroqueña has not only been used in art and building construction, but has also been cited in literature since the Middle Ages by travellers crossing the Guadarrama Mountains. Pinciano Hernán Núñez’s 1555 compilation of sayings includes one on the durability of Piedra Berroqueña. The Piedra Berroqueña region was mentioned in the second half of the nineteenth and first quarter of the twentieth centuries by authors such

as Francisco Giner de los Ríos (1839-1915), Miguel de Unamuno (1864-1936), Pío Baroja (1872-1956), Antonio Machado (1872-1956) and José Ortega y Gasset (1883-1955).

Carlos de Haes (1826-1898) painted “Valle en la Sierra de Guadarrama”, Martín Rico (1833-1908) “Arroyo de la Sierra de Guadarrama”, Jaime Morera (1858-1927) “Guadarrama, Picos de la Najarra” and Joaquín Sorolla (1863-1923) “Tormenta sobre Peñalara”.

Guided tours have now been instituted (Perez-Monserrat et al., 2013) to enhance public awareness of and spotlight emblematic buildings bearing Piedra Berroqueña.

PETROPHYSICAL PROPERTIES, CHEMICAL ANALYSIS AND DURABILITY OF PIEDRA BERROQUEÑA

The tectonic, petrological, petrophysical and chemical characteristics of Piedra Berroqueña are similar across the region (Tables 2-3).

These characteristics are largely conditioned by a linear crack density (LCD) (Wang et al., 1989; Sousa et al., 2005; Ismael and Hassan, 2008; Vázquez, 2010) that ranges from the highest (1.8 microcracks per millimetre) in Zarzalejo granite to the lowest (0.9 microcracks per millimetre) in Colmenar Viejo granite (Freire-Lista et al., 2015a).

The increase in LCD after exposing the AL, CA, CO and ZA stones to 280 freeze/thaw cycles was similar in all the granites studied (Table 4).

Piedra Berroqueña has resisted weathering for centuries. Its low anisotropy, capillary absorption and porosity and high mechanical strength and durability protect it from damp and capillary rise. Ashlars hewn from this stone were traditionally used as pedestals for statues and on dados and building façades.

Despite its resistance to alteration, it may be subject to decay (Fig. 4) in the form of salt efflorescence (Fig. 4a), biodecay (Fig. 4b), surface scaling (Fig. 4c) or cracking (Fig. 4d), with the concomitant loss of volume. These forms of decay are primarily the result of climate, air pollution or the presence of salts (Pérez-Monserrat et al., 2013), in conjunction with other factors. The occurrence of microgranular nodules in these

granites may also expedite weathering resulting from the differential thermal behaviour associated with these inhomogeneities (Gómez-Heras et al., 2008). Stone with larger feldspar crystals, more biotite and no cordierite or amphibole is more vulnerable to decay than stone containing cordierite, whose crystals are smaller.

Pre-quarrying decay, gloss (micro-roughness), finish and position on buildings and type of decay condition the type of maintenance or cleaning required. The methods used must not roughen the stone (Vazquez-Calvo et al., 2012): old ashlar quarried at the surface, with feldspars that may consequently be altered, must be treated with particular care.

NEED FOR GHSP STATUS FOR THE PIEDRA BERROQUEÑA REGION

Towns in the province of Madrid are losing their traditional identity because of the increased use of stone from other regions as replacement or building stone. This change has a heavy impact on the conservation of heritage buildings in historic urban cores.

Action to reverse this trend is needed on the local, regional, national and even international scale. Moreover, society at large should be made aware of the importance of construction materials in the local heritage and economy.

To that end, the Group for Petrology Applied to Heritage Conservation, in conjunction with local quarries, conducts activities such as guided tourist routes to enhance public awareness of Piedra Berroqueña (<http://www.madrimasd.org/English/Science-Society/scientific-heritage/Geomonumental-Routes/default.asp>). Popular cultural outings such as the tour of the “Valle de los caídos” have been conducted in recent years under the umbrella of Madrid's Science Week.

Another initiative, jointly backed by one municipality and the Region of Madrid, has led to the creation of a regional archaeological and geological interpretation centre (<http://www.igeo.ucm-csic.es/en/igeo/noticias/588-risco>). Similarly, a history book for the general public now in print contains a chapter dealing with quarries and their contribution to the construction of one of Madrid's historic quarters.

Designation of the Piedra Berroqueña region as a GHSP would help rally all the stakeholders around a set of shared interests: to train local quarrymen, to further the use

of traditional building stone, and to secure greater national and international visibility for Piedra Berroqueña.

CONCLUSIONS

Piedra Berroqueña, which forms part of the Region of Madrid's tangible and intangible heritage, is exported world-wide. Heritage buildings bearing this stone form part of Spain's history and culture, and as such must be conserved for future generations. Their restoration with material from the Piedra Berroqueña region will ensure more effective conservation of the tangible and intangible heritage.

The supply of manually hewn Piedra Berroqueña is guaranteed in the homonymous region.

The physical properties of Piedra Berroqueña, which afford it great durability, vary little from one variety to another and depend on the degree of alteration.

Traditionally, Alpedrete and Zarzalejo monzogranites were the stones most widely used in heritage buildings in the city of Madrid, whereas Colmenar Viejo monzogranite was used primarily for its pavers and cobblestones. Although the properties of these granites are similar, the crystal size is larger in Zarzalejo granite.

Whilst Cadalso de los Vidrios and La Cabrera granites were used as building materials in the villages near their respective quarries from Roman times and earlier until the mid-late twentieth century, neither was deployed in Spain's capital city.

Today, however, output at Cadalso de los Vidrios and La Cabrera is greater than at Alpedrete, Zarzalejo or Colmenar Viejo. The existence of a considerable number of historical as well as mechanised quarries ensures that the demand for restoration and construction works can be met.

The petrographic, petrophysical, mechanical and aesthetic properties of Piedra Berroqueña, along with its durability and the large number of quarries still in operation, make the region where it outcrops eligible for designation as a Global Heritage Stone Province (GHSP) (Pereira and Cooper, 2015).

Such a designation will enhance public awareness of the past and present of this cultural asset and the features that are vital to its conservation, while ensuring fuller use of Piedra Berroqueña as a construction material.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by the Community of Madrid under the GEOMATERIALS 2-CM program (S2013/MIT-2914). The authors are members of the Complutense University of Madrid's Research Group: "Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio" (ref. 921349).

The petrophysical assessments were run at the IGEO Petrophysical Laboratory, affiliated with the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM) Heritage Laboratory Network (RedLabPat).

The authors wish to thank reviewer Barrie Clarke and the special issue editors for comments on the manuscript.

REFERENCES

- AIDICO. Instituto Tecnológico de la Construcción, 2012, Informe Sectorial de la Piedra Natural en España 2012: Observatorio del mercado de la piedra natural. Instituto tecnológico de la Construcción, 72 p.
- Aranguren, J., and López, C., 1990, El ferrocarril de Villalba a El Berrocal: Carril, v. 29, p. 43–51.
- Bellido, F., 1979, Estudio petrográfico y geoquímico del Plutón granítico de la Cabrera (Madrid): Unpublished PhD thesis. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain, 331 p.
- Bernabéu, A., Benavente, D., Fort, R., García del Cura, M.A., Martínez-Martínez, J., and Mendiña, J., 2004, Valoración petrofísica del granito de Zarzalejo (Sistema Central) para su utilización como piedra de pavimento en cascos históricos. 6º Reunión Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural: CSIC, Seville, Centro Nacional de Aceleradores, p. 17–19.
- Brandebourger, E., 1984, Les granitoïdes hercyniens tardifs de la Sierra de Guadarrama (Système Central Espagne) Petrographie et géochimie: Unpublished PhD thesis, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 209 p.

- Cabello y Lapiedra, L.M., 1901, Madrid y sus arquitectos en el siglo XIX: Resumen de Arquitectura, v. 3, p. 35.
- Calero, M.C., 1992, Índice de documentos del libro de privilegios reales del monasterio de Santa Maria de Rioseco (1126-1481): CEMYCYTH, v. 27, p. 335–358.
- Colmenarejo, F., 1986, El yacimiento arqueológico de Fuente del Moro: Proceedings of I Congress of Spanish Medieval Archeology, p. 221–239.
- Colmenarejo, F., Rovira, C., Antona, A.M., and Pérez, S., 2005, Guía del yacimiento arqueológico de Remedios: un cementerio rural durante la antigüedad tardía (siglo VII.), Part 3: Concejalía de Cultura, 118 p.
- Cooper, B.J., 2010, Toward establishing a “Global Heritage Stone Resource” designation: Episodes, v. 33 (1), p. 38–41.
- Cooper, B.J., Marker, B.R., and Thomas, I.A., 2013a, Towards international designation of a Heritage Dimension Stone: Key Engineering Materials, v. 548, p. 329–335, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.548.329>.
- Cooper, B.J., Marker, B.R., Pereira, D., and Schouenborg, B., 2013b, Establishment of the “Heritage Stone Task Group” (HSTG): Episodes, v. 36 (1), p.8–9.
- Del Corral, J., 1972, El Casino de la Reina: Villa de Madrid, v.35–36, p. 17–22.
- De Vicente, G., Vegas, R., Muñoz, A., Silva, P.G., Andriessen, P., Cloetingh, S., González, J.M., Van Wees, J.D., Álvarez, J., Carbó, A., and Olaiz, A., 2007, Cenozoic thick-skinned deformation and topography evolution of the Spanish Central System: Global and Planetary Change, v. 58, p. 335–381, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.042>.
- Fort, R., 2008, La Piedra Natural y el Patrimonio construido: Un mismo campo de investigación: Materiales de Construcción, v. 58, p. 289–290.
- Fort, R., Mingarro, F., and López de Azcona, M.C., 1996, Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid. Geogaceta, v. 20 (5), p. 1236–1239.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E., and Varas, M.J., 2010, Characterisation of monzogranitic batholiths as a supply source for heritage construction in the northwest of Madrid: Engineering Geology, v. 115, p. 149–157, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.09.001>.
- Fort, R., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M., and Martin-Freire, D., 2011, Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone: Journal of Geophysics and Engineering, v. 8, p. S132–S144, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/8/3/S13>.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., Gomez-Heras, M., Varas-Muriel, M.J., and Freire, D.M., 2013a, Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain: Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 46, p. 421–429, <http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2012-041>.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., and Perez-Monserrat, E.M., 2013b, Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 61, p. 296–305, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.048>.
- Fort González, R. Alvarez de Buergo, M., Mingarro Martín, F., and López de Azcona, M.C., 2004, Stone decay in 18th century monuments due to iron corrosion. The Royal Palace, Madrid (Spain): Building and Environment, v. 39, p. 357–364, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.09.012>.
- Freire-Lista, D.M, Fort, R., and Varas-Muriel, M.J., 2015a, Freeze-thaw fracturing in building granites: Cold Regions Science and Technology, v. 113, p. 40–51, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.01.008>.

- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015b, Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation: *Episodes*, v. 38 (2), p. 106–113.
- Freire-Lista, D.M., Gomez-Villalba, L.S., and Fort, R., 2015c, Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes: *Periodico di Mineralogia*, v.82 (in press).
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., and Varas-Muriel, M.J., 2015d, Nomination of Zarzalejo granite, a Spanish heritage building stone, as a “Global Heritage Stone Resource”: *Energy Procedia*, (in press). DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.886.
- García del Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A., and Martínez-Martínez, J., 2008, The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers: *Materiales de Construcción*, v. 58, p. 65–79.
- Gil, J., 2013, Entretérminos y Samburiel, panteones prehistóricos de la Sierra: *Apuntes de la Sierra*, v. 216, p. 5–8.
- Gómez-Heras, M., 2005, Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico: Unpublished Phd thesis, Univeridad Complutense de Madrid, Madrid, Spain, 339 p.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J., and Fort, R., 2008, Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty: *Environmental Geology*, v. 56, p. 547–560, <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-008-1356-3>.
- Guerra, E., and Zapata, R., 2010, La Capilla del Obispo (de Nuestra Señora y San Juan de Letrán): Conference in Universidad de Mayores Experiencia Recíproca, 23 p. Available from: <http://umer.es/images/doc/n60.pdf>
- Gutiérrez, J., 1997, La fábrica de cervezas "El Águila" de Madrid/España: *Informe de Construcción*, v. 49, p. 23–30.
- Hughes, T., Lott, G.K., Poultney, M.J., and Cooper, B.J., 2013, Portland Stone: A nomination for “Global Heritage Stone Resource” from the United Kingdom: *Episodes*, v. 36, p. 221–226.
- Ismael, I.S., and Hassan, M.S., 2008, Characterization of some Egyptian serpentinites used as ornamental stones: *Chinese Journal of Geochemistry*, v.27, p.140–149, <http://dx.doi.org/10.1007/s11631-008-0140-0>.
- Llorente, J.M., 2011, El valor indicador de los topónimos. El caso de la voz berrocal y sus variantes: *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, v. 56, p. 50–77.
- López-Arce, P., Fort, R., Gómez-Heras, M., Pérez-Monserrat, E., and Varas-Muriel, M.J., 2011, Preservation strategies for avoidance of salt crystallisation in El Paular Monastery cloister, Madrid, Spain: *Environmental Earth Sciences*, v. 63, p. 1487–1509, <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0733-x>.
- López de Azcona, M.C, Fort, R., and Mingarro, F., 2002, Conservation of the stone in Cibeles Fountain, Madrid (Spain): *Materiales de construcción*, v. 52, p. 65–74.
- López Sáez, J.A., Pérez Díaz, S., Núñez de la Fuente, S., Alba Sánchez, F., Serra González, C., Colmenarejo García, F., Gómez Osuna, R., and Sabariego Ruiz, S., 2015, Paisaje visigodo en la cuenca alta del Manzanares (Sierra de Guadarrama): análisis arqueopalinológico del yacimiento de Navalvillar (Colmenar Viejo, Madrid): *Arqueología y Prehistoria del Interior peninsular*, v. 2, p. 133–145.
- López-Urrutia, L., 1926, Hospital de San Francisco de Paula para Jornaleros: copia de la escritura pública del 1 de marzo de 1926 a Doña Dolores Romero y Arano: *Archivo Regional de la Comunidad de Madrid*, expediente, nº 4259/8, 162 p.
- Losada, H., 1976, El dolmen de Entretérminos (Madrid): *Trabajos de Prehistoria*, v. 33, p. 209–236.

- Marqués de la Ensenada, 1752, Catastro del marqués de la Ensenada: Gobierno de España, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Available from: <http://pares.mcu.es/Catastro/>.
- Martín, S., 1994, Materiales Pétreos Tradicionales de Construcción en Madrid: Unpublished PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, 772 p.
- Martín-Serrano, A., 2007, Mapa Geológico de España escala 1:50.000, 2ª Serie (MAGNA), Villa del Prado (580): IGME. Servicio Publicaciones Ministerio de Industria.
- Maure, L.P., 1985, Secundino Zuazo: La arquitectura y el urbanismo en España en el primer tercio el siglo XX: Unpublished PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, 483 p.
- Méndez, D., 2009, El Valle de los Caídos. Idea, proyecto y construcción: Abadía de la Santa Cruz del Valle de los Caídos (2nd edition), 273 p.
- Mendiña, J., and Fort, R., editors, 2005, Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX: IGME-IGE (Instituto Geológico y Minero de España-Instituto de Geología Económica), 172 p.
- Merlos, M., 2005, José Segundo de Lema: Nineteenth- Century Architecture in Aranjuez: Espacio, Tiempo y Forma, v.18–19, p. 209–235.
- Navascués, P., 1993, Arquitectura española, 1808–1914: Summa Artis, v. 35. Espasa-Calpe, Madrid, 745 p.
- Olivé, S., 1990, Historia de la telegrafía óptica en España: Secretaría General de Comunicaciones, Ministerio de Transporte, turismo y comunicaciones, 101 p.
- Pereira, D., and Cooper, B., 2015, A global Heritage Stone Province in association with the UNESCO World Heritage City of Salamanca, Spain: Engineering Geology for Society and Territory, v.5 p. 205–208, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_39.
- Pérez Monserrat, E.M., and Fort González, R., 2004, Caracterización y procedencia de la sillería granítica del convento de la Encarnación, Madrid: Geotemas. VI Congreso Geológico de España, v. 6(1), p. 89–92.
- Pérez-Monserrat, E.M., Alvarez de Buergo, M., Gómez-Heras, M., Varas Muriel, M.J., and Fort, R., 2013, An urban geomonumental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain: Environmental Earth Sciences, v. 69, p. 1071–1084, <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-2164-3>.
- Priego, C., 1991, Pinturas rupestres del abrigo de Los Aljibes en La Pedriza del Manzanares: Estudios de Prehistoria y Arqueología Madrileños, v. 7, p. 87–123
- ROC Máquina, 2009: Reed Business Information, 277 p.
- Rodríguez-Fernández, L.R., 2000, Mapa Geológico de España escala 1:50.000, 2ª Serie (MAGNA), Colmenar Viejo (534): IGME. Servicio Publicaciones Ministerio de Industria.
- Sousa, L.M.O., Suarez del Rio, L.M., Calleja, L., Ruiz de Argondona, V.G., and Rey, A.R., 2005, Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites: Engineering Geology, v. 77, p. 153–168, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.001>.
- Tovar, V., 1983, Inventario artístico de edificios religiosos madrileños de los siglos XVII y XVIII: Centro Nacional de Información Artística, Arqueológica y Etnológica (Spain), 260 p.
- Unceta, M., and Echenagusía, J., 2005, Madrid: la sierra del agua: guía turística del Canal de Isabel II. Santillana Ediciones generales: El País/Aguilar, 220 p.

- UNE-EN 12371 (European standard), 2001, Natural stone test methods, Determination of frost resistance: AENOR (Spanish Association for Standardisation and Certification), 16 p.
- Vázquez, P., 2010, Granitos ornamentales: caracterización, durabilidad y sugerencias de uso: Unpublished PhD thesis, Universidad de Oviedo, Spain, 314 p.
- Vazquez-Calvo, C., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., and Varas-Muriel, M.J., 2012, The measurement of surface roughness to determine the suitability of different methods for stone cleaning: *Journal of Geophysics and Engineering*, v. 9, p.S108–S117, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/9/4/S108>.
- Villaseca, C., and Herreros, V., 2000, A sustained felsic magmatic system: the Hercynian granitic batholith of the Spanish Central System: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, v. 91, p. 207–219, <http://dx.doi.org/10.1017/S0263593300007380>.
- Villaseca, C., Barbero, L., and Rogers, G., 1998, Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints: *Lithos*, v. 43, p. 55–79, [http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00002-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00002-4).
- Villaseca, C., Bellido, F., Pérez-Soba, C., and Billström, K., 2009, Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt: *Mineralogy and Petrology*, v. 96, p. 197–211, <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-009-0057-2>.
- Villaseca, C., Orejana, D., and Belousova, E.A., 2012, Recycled metagneous crustal sources for S- and I-type Variscan granitoids from the Spanish Central System batholith: Constraints from Hf isotope zircon composition: *Lithos*, v. 153, p. 84–93, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.024>.
- Wang, H.F., Bonner, B.P., Carlson, S.R., Kowallis, B.J., and Heard, H.C., 1989, Thermal stress cracking in granite: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 94, p. 1745–1758, <http://dx.doi.org/10.1029/JB094iB02p01745>.



Figure 1.

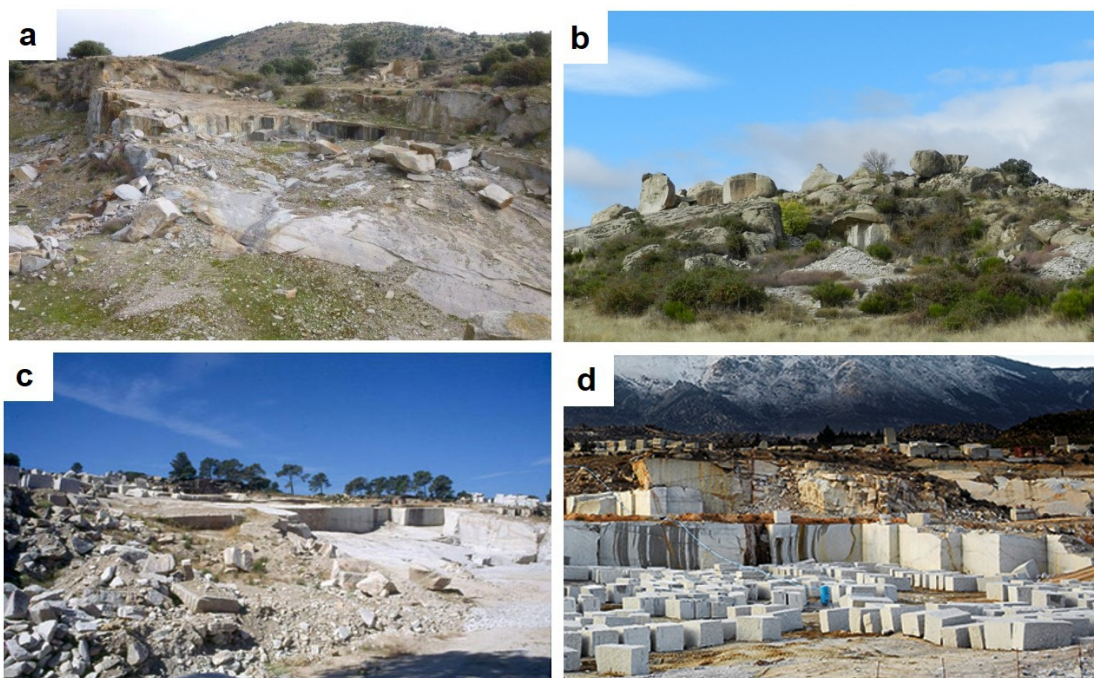


Figure 2.

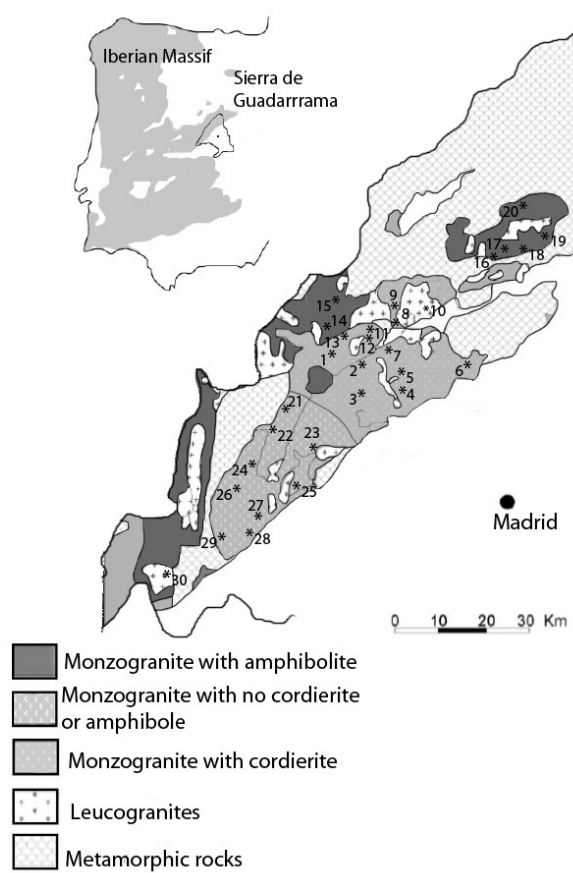


Figure 3.

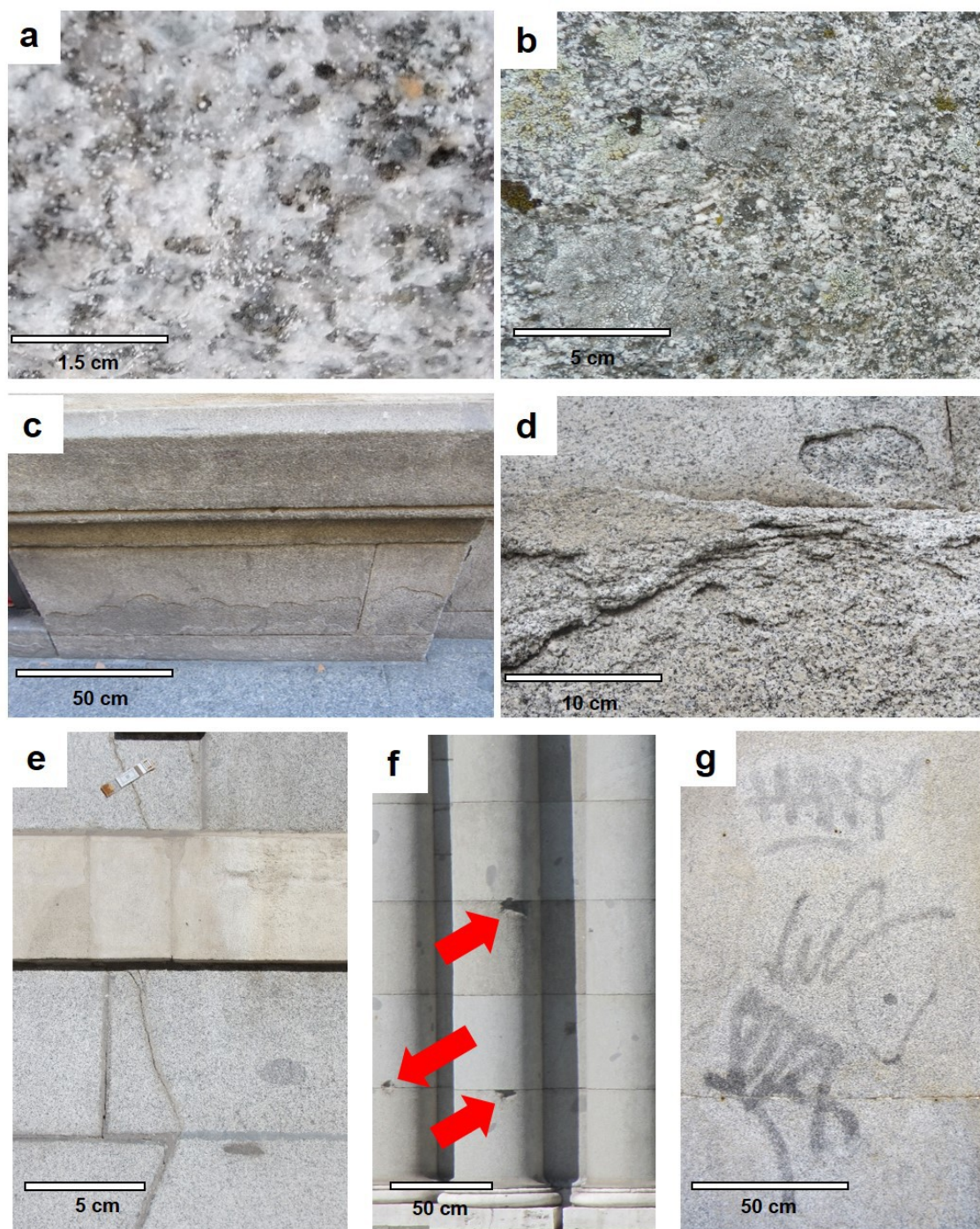


Figure 4

Table 1.

Works	Year built	References
Roman road, Caratrava, Cercedilla and Zarzalejo	Before 3rd century	Martín, 1994
Batán and Grajal Roman bridges at Colmenar Viejo	Before 3rd century	Colmenarejo, 1986
Archaeological site at Navalvillar	6th-7th centuries	López Sáez et al., 2015
Fuente del Moro archaeological site	6th-7th centuries	Colmenarejo, 1986
"Remedios" necropolis	After 7th century	Colmenarejo et al., 2005
El Paular monastery	1086	López-Arce et al., 2011
Nuestra Señora de la Asunción Church at Alpedrete	12th-13th centuries	Menduiña and Fort, 2005
Bernardos Monastery	12th century	Calero, 1992
Church at Fuente el Saz del Jarama	13th century	Menduiña and Fort, 2005
Castle at Manzanares el Real	1247	Menduiña and Fort, 2005
El Paular Monastery (intervention)	1440–1486	López-Arce et al., 2011
Bishos Chapel	1520-1535	Guerra and Zapata, 2010
Las Descalzas Reales Monastery	1559-1564	Martín, 1994
San Lorenzo Royal Monastery at Escorial	1563-1584	Fort et al., 2013a
Segovia Bridge	1582-1584	Martín, 1994
Plaza Mayor (main square)	1590, later reconstructions	Martín, 1994
Agustinas Recoletas de la Encarnación Monastery	1611-1616	Bernabéu et al., 2004
Nuestra Señora del Carmen y San Luis Church	1611-1638	Menduiña and Fort, 2005
Agustinas Recoletas de Santa Isabel Monastery	1640-1667	Tovar, 1983
San Ginés Church	1641-1645	Martín, 1994
San Andrés Church	1657-1669	Martín, 1994
Concepción Real de Calatrava Church	1670-1678	Menduiña and Fort, 2005
San Isidro Collegiate Church	1673-1675	Menduiña and Fort, 2005
San Ildefonso de Trinitarias Descalzas Convent	1673-1688	Tovar, 1983
Toledo Bridge	1719-1724	Menduiña and Fort, 2005
Royal Palace at Madrid	1738-1764	Fort et al., 2004
Palace of Prince Luis de Borbón	1763-1765	Fort et al., 1996
Prado Museum	1785-1808	Martín, 1994
Alcalá Gate	1770-1778	Martín, 1994
Botanical Garden winter shelters	1779-1781	Martín, 1994
Royal Theatre	1830-1850	Menduiña and Fort, 2005
National Library	1862-1892	Martín, 1994
Dam at El Villar	1870-1873	Unceta and Echenagusía, 2005
San José Homeopathic Hospital	1874-1878	Merlos, 2005
Veterinary School - Former Casino de la Reina	1877-1881	Del Corral, 1972
Niño Jesús Hospital	1879-1881	Navascués, 1993
Bank of Spain	1884-1891	Navascués, 1993
Ministry of Agriculture, Fisheries and Food	1893-1897	Navascués, 1993
Milagrosa Church	1900-1904	Menduiña and Fort, 2005
La Concepción Church	1902-1914	Menduiña and Fort, 2005
Former Maudes Street Workers' Hospital in Madrid	1909-1916	López-Urrutia, L. 1926
El Águila beer factory	1912-1914	Gutiérrez, 1997

San Francisco de Sales Church	1926-1931	Martín, 1994
Nuevos Ministerios	1933-1942	Maure, 1985
Valle de los caídos monument	1940-1958	Méndez, 2009
Moncloa Palace reconstruction	1953	Menduiña and Fort, 2005
IFEMA	1980	Source: Granite production compay
Addition to the Reina Sofia Museum	2001-2005	Source: Granite production compay
Addition to the Bank of Spain	2003	Source: Granite production compay
New buildings.Other countries (Source: Granite production compay)		
Atatürk Airport, at Istanbul, Turkey		
Zine El Abidine Ben Ali Airport (New Enfidha International Airport)		
Singapore Post Center		
Mall Boulevard - Las Vegas, Nevada, USA		
Cathedral Place - Vancouver ,Canada		
Sam Jung Building, Seoul, Korea		
Cork Airport, Ireland		
Magit Palace - Budapest, Hungary		
Migdalot Tower - Tel Aviv, Isreal		
Terra Park - Budapest, Hungary		
Federal Deposit Insurance Corporation building - Washington, D.C., USA		
Yayasan Sultan Hassanah Bolkiah - Brunei		
Capval - Nouveau Berci - Paris, France		
Istanbul Airport, Turkey		
Capitol East End Complex - Sacramento, California, USA		
Granite Castle, English Channel Island, UK		
US Embassy at Abidjan, Ivory Coast		
Opera Tower, Tel Aviv, Israel		
Zamert Tower, Tel Aviv, Israel		
Platinum/Milenyom Towers, Tel Aviv, Israel		
Great America Plaza, San Diego, California, USA		
Migdalot Tower, Tel Aviv, Israel		
Oceanus, Herzlelia, Israel		
Herzelia Square, Herzkliia, Israel		

Table 2.

Property	AL	CA	CO	LA	ZA
Impact strength (cm)	68±14 ⁽²⁾	-	-	44 ⁽⁵⁾	58.8 ⁽¹⁾
Compressive strength (MPa)	136.9±41 ⁽²⁾	-	-	203 ⁽⁵⁾	160.0±49.0 ⁽¹⁾
Bending strength (MPa)	8.88±3.69 ⁽²⁾	-	-	11.06 ⁽⁵⁾	8.21±2.25 ⁽¹⁾
Bulk density (Kg/m³)	2 636±18 ⁽⁴⁾	2 602±16 ⁽⁴⁾	2 629±13 ⁽⁴⁾	-	2 657±15 ⁽⁴⁾
Young's Modulus (MPa)	33 275 ⁽⁴⁾	35 377 ⁽⁴⁾	66 838 ⁽⁴⁾	-	26 882 ⁽⁴⁾
Water absorption (%)	0.29 to 0.31 ⁽³⁾	0.41 to 0.49 ⁽³⁾	0.28 to 0.41 ⁽³⁾	0.2 ⁽⁵⁾	0.54 to 58 ⁽³⁾
Water saturation (%)	0.5±0.2 ⁽¹⁾	-	-	-	1.24 ⁽¹⁾
Capillary absorption coefficient (g·m⁻²·s^{-0.5})	1.523 to 3.983 ⁽³⁾	3.502 to 4.706 ⁽³⁾	0.969 to 1.437 ⁽³⁾	-	4.238 to 4.796 ⁽³⁾

Porosity accessible to water (%)	0.8±0.1 ⁽⁴⁾	1.2±0.2 ⁽⁴⁾	0.7±0.1 ⁽⁴⁾	-	1.7±0.06 ⁽⁴⁾
Porosity measured by HG intrusion (%)	0.44 ⁽⁴⁾	0.95 ⁽⁴⁾	0.59 ⁽⁴⁾	-	1.4 ⁽⁴⁾
Frost resistance (%)	0.01 ⁽²⁾	-	-	0.07 ⁽⁵⁾	0.005 ⁽¹⁾
Ultrasonic P-wave velocity (m/s)	4 625±163 ⁽⁴⁾	3 687±300 ⁽⁴⁾	5 051±349 ⁽⁴⁾	-	3 219±204 ⁽⁴⁾
Ultrasonic S-wave velocity (m/s)	3 812±92 ⁽⁴⁾	2 596±110 ⁽⁴⁾	3 494±94 ⁽⁴⁾	-	2 2116±89 ⁽⁴⁾
Total anisotropy (%)	5.8 ⁽³⁾	15.3 ⁽³⁾	3.5 ⁽³⁾	-	12.7 ⁽³⁾
LCD (microcracks per mm)	1.1 ⁽⁵⁾	1.8 ⁽⁵⁾	0.9 ⁽⁵⁾	-	1.2 ⁽⁵⁾

Table 3.

Chemical analysis					
Major elements	AL wt% ⁽¹⁾	CA wt% ⁽²⁾	CO wt% ⁽³⁾	LA wt% ⁽⁴⁾	ZA wt% ⁽⁵⁾
SiO ₂	69.60	76.94	74.15	76.02	68.97
TiO ₂	0.4	0.08	0.14		0.55
Al ₂ O ₃	15.02	12.83	13.50	12.99	15.17
Fe ₂ O ₃	2.97	1.07	0.23	0.29	3.26
FeO	1.54		1.15	0.72	1.11
MnO	0.05	0.04	0.05	0.03	0.06
MgO	0.96	0.16	0.56	0.22	1.19
CaO	2.45	0.78	0.93	0.90	2.47
Na ₂ O	3.32	3.4	3.32	3.30	3.21
K ₂ O	3.89	4.48	4.79	4.58	4.07
P ₂ O ₅	0.16	0.04	0.06	0.03	0.13

Table 4.

LCD: FT test results			
Granite	Cycle 0	Cycle280	Δ 0 to 280 (%)
Alpedrete	1.1	3.2	193
Cadalso de los Vidrios	1.8	3.7	107
Colmenar Viejo	0.9	2.3	150
Zarzalejo	1.2	3.9	228

List figure captions:

Figure 1. a: lintel in historic quarry at Alpedrete; b: laying of Piedra Berroqueña at Madrid's Santo Domingo Square; c: outdoor Quarry Museum at El Berrueco; d: shoeing pen at Villavieja de Lozoya; e: quarrymen's competition at Colmenar Viejo; f: Geology Museum at Colmenar Viejo.

Figure 2. a: historic quarry at Alpedrete; b: historic quarry at Zarzalejo; c: quarry in operation at Cadalso de los Vidrios; d: quarry in operation at La Cabrera.

Figure 3. Towns with the highest density of historic quarries in the Piedra Berroqueña región. *Monzogranites with cordierite*: (1) Alpedrete, (2) Moralarzal, (3) Galapagar, (4) Torrelodones, (5) Hoyo de Manzanares, (6) Colmenar Viejo, (7) Cerceda, (8) El Boalo, (9) Mataelpino, (11) Becerril de la Sierra, (12) El Berrocal, (13) Collado Mediano. *Monzogranites with amphibole*: (14) Los Molinos, (15) Cercedilla, (16) Bustarviejo, (17) Valdemanco, (18) La Cabrera, (19) El Berrueco, (20) Lozoyuela-Navas-Sieteiglesias. *Monzogranites with no cordierite or amphibole*: (21) San Lorenzo del Escorial, (22) Zarzalejo, (23) Valdemorillo, (24) Robledo de Chavela, (25) Navalagamella (26) Fresnedilla de la Oliva, (27) Colmenar de Arroyo, (28) Chapinería, (29) Navas del Rey. *Leucogranite*: (10) Manzanares el Real, (30) Cadalso de los Vidrios.

Figure 4. Decay in Piedra Berroqueña: A: salt efflorescence, indoor columns on Conde Duque Palace, Madrid; B: biodecay, Nuestra Señora de la Asunción church, Colmenar Viejo; C: scaling; Madrid; D: scaling and flaking; San Andrés Church, Madrid; E: cracking; Chamber of Deputies, Spanish Parliament, Madrid; F: Bullet impact, Alcalá Gate, Madrid; G: graffiti, Madrid.

List table captions:

Table 1. Emblematic monuments in the region of Madrid built with Piedra Berroqueña and other types of stone.

Table 2. Physical properties of Piedra Berroqueña (1) Bernabéu et al., 2004; (2) Mendiuña and Fort., 2005; (3) Fort et al., 2011; (4) Freire-Lista et al., 2015a; (5) ROC Máquina, 2009.

Table 3. Chemical analysis for Alpedrete, Cadalso de los Vidrios, Colmenar Viejo, La Cabrera and Zarzalejo granites. (1) Villaseca et al., 1998; (2) Martín-Serrano, 2007; (3) Rodríguez-Fernández, 2000; (4) Bellido, 1979; (5) López de Azcona et al., 2002.

Table 4. Linear crack density (LCD) for Alpedrete, Cadalso de los Vidrios, Colmenar Viejo and Zarzalejo granites in freeze-thaw (FT) cycles 0 and 280.

6.9 Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation.

Episodes, 38(2):106-113.

Freire-Lista, D.M., Fort, R. y Varas-Muriel, M.J.,

El granito de Alpedrete se corresponde con un monzogranito que se extrae en las estribaciones de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español) de la provincia de Madrid, España. Concretamente, en el pueblo de Alpedrete y localidades cercanas. Este granito ha sido utilizado como material de construcción desde el neolítico y es uno de los granitos más representativos del patrimonio construido madrileño.

Los pueblos que se ubican en las proximidades de Alpedrete se caracterizan por conservar un paisaje y una cultura asociada a la cantería. En ellos existen numerosas canteras históricas y una cantera hoy en día en activo. Existen abundantes talleres de corte y labra que bien continúan otorgando un acabado tradicional a los sillares de granito, bien mediante técnicas más modernas proporcionan distintos acabados superficiales.

Las características petrofísicas y elevada durabilidad del granito de Alpedrete han permitido que lleguen hasta nuestros días en buen estado de conservación edificios muy representativos en Madrid, como el Palacio Real, la Puerta de Alcalá o la Biblioteca Nacional. Además de ser utilizado en gran número de edificios patrimoniales de Madrid, esta piedra de construcción también forma parte de la mayoría de edificios de viviendas, mobiliario urbano y pavimentos de las calles de la ciudad y la práctica totalidad de la arquitectura rural de la zona de Alpedrete.

Se presentan las características del granito de Alpedrete, petrológicas, petrofísicas y de durabilidad así como su uso histórico y las canteras explotadas, información que avala su candidatura como recurso pétreo del patrimonio mundial.

by D. M. Freire-Lista^{1,2*}, R. Fort^{1,2} and M. J. Varas-Muriel^{1,3}

Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation

¹ Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC – Complutense University of Madrid UCM. Madrid, Spain.

*E-mail: d.freire@igeo.ucm-csic.es, rafael.fort@csic.es

² CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid, Spain

³ School of Geology. Complutense University of Madrid UCM. 28040 Madrid, Spain. E-mail: mjvaras@geo.ucm.es

(Received September 12, 2014; Revised accepted November 01, 2014)

Alpedrete granite is a monzogranite quarried in the Sierra de Guadarrama (Spanish Central System) foothills in and around Alpedrete, in the province of Madrid, Spain. Used as a building material since the Neolithic, it is one of the most representative of heritage granites of Madrid.

Alpedrete and the surrounding region are characterised by a quarrying culture that has been maintained for centuries. The area is strewn with historic quarries, along with the one presently in operation. Traditional stone cutters who produce hand-finished granite ashlar are still to be found, while others use more modern techniques to achieve new types of products.

Representative monuments including Royal Palace of Madrid, Alcalá Gate and the National Library owe their good conservation state largely to the petrophysical properties and durability of Alpedrete granite. In addition to its use in a substantial number of heritage buildings in Madrid, this stone is also found in most of the city's housing, urban furniture and cobble-stoned streets and nearly all the rural architecture in the Alpedrete area.

This paper discusses the petrological and petrophysical properties of Alpedrete granite, as well as its durability, historic use and quarries, in support of its nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation.

Introduction

The granite in Madrid's *Sierra de Guadarrama*, traditionally commercialised under the name *Piedra Berroqueña*, has been the building stone most widely used in central Spain throughout the region's history. Specifically, a Carboniferous (302 M.a) (Villaseca et al., 2012) monzogranite with cordierite as an accessory mineral (Figure 1), has been quarried for centuries at Alpedrete, a town

approximately 45 km north of Spain's capital city. This was the stone most frequently chosen for Madrid's built heritage due to the abundance and quality of the material and proximity of the quarries (Fort et al., 2013). Its role in the city's heritage, along with its petrography, petrophysics, mechanical and aesthetic properties and durability make this granite a worthy nominee for the Global Heritage Stone Resource (GHSR, Cooper, 2010; Cooper et al., 2013a) designation. The present account of the history and usage of Alpedrete granite and its traditional and modern quarries aims to establish its distinctive identity.

This paper discusses the characteristics and legacy (Table 1) of the stone in sufficient detail for GHSR assessment by the Heritage Stone Task Group (HSTG) Board, as specified in the Task Group's Terms of Reference. HSTG establishment is narrated by Cooper et al. (2013b). Alpedrete granite might be regarded as the first of several dimension stones that could contribute to the *Piedra Berroqueña* region's designation as a “Global Heritage Stone Province”.

Alpedrete granite, a grey stone that may contain microgranular mafic nodules (Villaseca et al., 1998), has left its imprint on Madrid's architectural personality and forms part of most of the city's buildings and streets.

Criteria for GHSR recognition

The following description of Alpedrete granite addresses all the features required of GHSR nominations (Cooper et al., 2013a; Hughes et al., 2013).

The importance of granite in the villages around Alpedrete (Figure 2) is mirrored in the stone-related etymology of some of their toponyms. Examples are *Alpedrete* itself (stone in Spanish is *piedra*) and *Berrocal* (in Spanish, an outcrop of granite boulders), names such as *Moralzarzal* are based on the pre-Roman roots *mor(r)* or *mur(r)*, meaning a pile of stone. These and other villages made stone quarrying their way of life: for centuries with the area's economic activity revolving around granite quarrying, hewing and transport. This long quarrying tradition led to the founding of many small historic, family-run quarries (Figure 3A) where the trade was and still is deeply rooted. The many monuments to the quarryman also attest to the determination to keep stone quarrying traditions alive (Figure 3B).

Alpedrete granite is regarded as a traditional building stone (Fort et al., 2008, 2013). Any number of scientific articles have been published on its origin (Villaseca et al., 1998, 2009, 2012; Villaseca

Table 1. Representative monuments in the Madrid region built with Alpedrete granite and other types of stone

Building	Year built	Fountains	Year built
Dolmen at Entretérminos	2500-3000 BCE	F. of Titans	1657
El Beneficio-Miacum Roman archaeological site	Before the 4 th century	F. of Fame	1731
Asunción de Nuestra Señora Church at Alpedrete	12 th -13 th centuries	F. of San Antón	1770
Toledo Bridge	1719-1732	Artichoke F.	1781
Madrid's Royal Palace	1738-1764	Galapagos F.	1832
Façadeon San Nicolás de los Servitas Church	1740 aprox.	King Philip IV F.	1843
Prado Museum	1785-1808	Fallen Angel F.	1880
Alcalá Gate	1770-1778	F. of the Shell	1969
House of the Five Major Guilds	approx. 1789	Sculptures	Year sculpted
Royal Theatre in Madrid	1830-1850	Hercules and the Lernean Hydra	1650
National Library	1866-1892	Obelisk to the 2 nd of May	1821
Bank of Spain	1884-1891	Queen Isabel	1883
Cervantes Institute	1925-1929	Monument to King Alfonso XII	1901
Joint Ministry Headquarters	1933-1942	Miguel de Cervantes	1916
Valley of the Fallen Monument	1940-1958	Princess Isabel de Borbón	1953
Addition to the Bank of Spain	2003	Jacinto Benavente	1961

and Herreros, 2000, historic quarries (Fort et al., 2010, 2013), petrology (Gómez-Heras et al., 2008), petrophysics (Fort et al., 2011), technical properties and durability (Gómez-Heras, 2005; López-Arce et al., 2010, 2011; Fort et al., 2011), as well as the buildings on which it is found (Fort et al., 2004, 2010, 2013; Menduina and Fort, 2005; Pérez-Monserrat et al., 2013).

Alpedrete granite properties

Petrography, petrographic name and commercial designation

Alpedrete granite is an equigranular, medium- to fine-grained monzogranite (Figure 1) consisting of interlocking plagioclase aggregates (20-30 vol. %), quartz (2-5mm and 30-40 vol. %), K feldspar (1-4 mm and 25-35 vol. %) and biotite (2 mm and 10-20 vol. %). Accessory minerals include ilmenite, apatite, cordierite and zircon.

Alpedrete granite is classified as a monzogranite and commercialised under that same name.

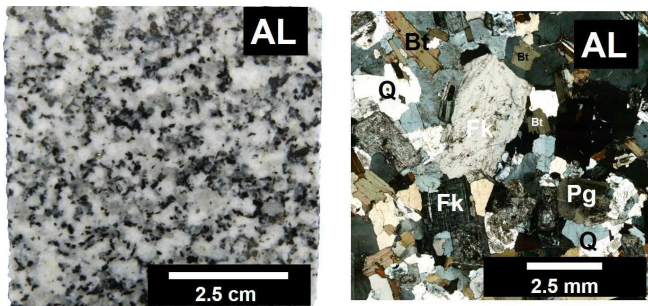


Figure 1. Alpedrete granite from historical quarries: left, macroscopic image; right, thin section petrographic image: Bt: biotite, Pg: plagioclase, Q: quartz, FK: potassium feldspar.

Alpedrete granite have micro-granular mafic enclaves, usually with a tonalite composition show fine-grained porphyritic textures, with phenocrysts commonly of millimetric size. (Gómez-Heras et al., 2008).

Chemical composition

The standard chemical analysis of Alpedrete granite given in Table 2 reveals its homogeneity.

Table 2. Mean chemical composition of Alpedrete granite (Villaseca et al., 1998).

Chemical analysis: majority elements in Alpedrete granite (wt%)										
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
69.6	0.4	15.02	2.97	1.54	0.05	0.96	2.45	3.32	3.89	0.16

Colour

Alpedrete granite is grey, with slight variations in tone. Its chromatic parameters are listed in Table 3. The colour values given are based on the CIELAB scale (1976): lightness (L*), chromatic coordinates a* and b*, whiteness index (WI) and yellowness index (YI), as set out in standard ASTM E313-73.

Table 3. Chromatic parameters

Alpedrete granite	
L*	67.4 ± 3.5
a*	-0.7 ± 0.3
b*	1.0 ± 0.8
YI	1.8 ± 1.6
WI	34.5 ± 3.8

Natural Variability

Alpedrete area granite has a highly homogeneous quartz, feldspar

and mica content and crystal size. Two varieties have been traditionally distinguished. *Piedra Rubia* (blonde stone), so called due to the yellowish tones induced by weathering, is quarried at shallower depths. The second variety *Alpedrete granite*, *sensu stricto*, is unaltered grey granite. The latter is the variety quarried at present.

Physical properties

Alpedrete granite owes its long durability and resistance to weathering to its physical properties. Table 4 lists the values of these properties as reported by several authors.

Table 4. Physical properties in Alpedrete granite (AL). (1) Mendiña and Fort., 2005, (2) Fort et al., 2011, (3) Fort et al., 2013.

Property	Value
Impact strength (cm)	68±14 ⁽¹⁾
Compressive strength (MPa)	136.9±41 ⁽¹⁾
Bending strength (MPa)	8.88±3.69 ⁽¹⁾
Bulk density (Kg/cm ³)	2669±17 ⁽²⁾
Water absorption (%)	0.3±0.0 ⁽²⁾
Capillary absorption coefficients (g·m ⁻² ·s ^{-0.5})	1.523 to 3.1983 ⁽²⁾
Porosity accessible to water (%)	0.8±0.1 ⁽²⁾
Mercury intrusion porosity (%)	0.5 ⁽³⁾
Frost resistance (%)	0.01 ⁽¹⁾
Ultrasonic P-wave velocity (m/s)	4601±204 ⁽²⁾
Total anisotropy (%)	5.8 ⁽³⁾

Durability

Alpedrete granite is found in heritage buildings that have resisted weathering for centuries. Decay in this stone adopts the form of cracking, surface scaling (Figure 4J), efflorescence, stains or granular disintegration and resulting volume loss. These weathering forms are due primarily to climate, air pollution or the presence of salts (López-Arce et al., 2010; Pérez-Monserrat et al., 2013), in conjunction with factors such as vandalism (Figure 4K). Where microgranular nodules are present (Figure 5D), differential decay may be observed between the nodule and the surrounding rock (Gómez-Heras et al., 2008).

To quantify the decline in petrophysical values, freeze-thaw testing was conducted as specified in European standard EN 12371: 2001 (140 cycles), while salt crystallisation trials were performed further to Spanish and European standard EN 12370:1999 (30 cycles) (López-Arce et al., 2010). The variations observed in the stone's petrophysical properties after these ageing tests are given in Table 5.

Laboratory-accelerated decay included surface cracking, generated especially in the feldspar (freeze/thaw test) and biotites (salt crystallisation). Severe decay has been observed in ornamental elements carved from Alpedrete granite on heritage buildings. Such decay is induced by human action: pollution, urination, rust in the iron anchorages used to join ashlar, breakage of downpipes, conservation treatments (Fort et al., 2004; Varas et al., 2007) or the use of inappropriate mortars (Muñoz, 2003).

Quarrying, resource location and supply

Around 400 historic, generally small, shallow quarries (Martín,

Table 5. Petrophysical properties in Alpedrete granite before and after 140-cycle freeze-thaw and 30-cycle salt crystallisation testing. Vp: ultrasonic P-wave velocity; Δ: property variation, measured in percentage (Source: López-Arce et al., 2010)

Property	Initial value	After 140-cycle freeze-thaw test	Δ (%)	After 30 cycle-salt crystallisation test	Δ (%)
Porosity accessible to water (%)	0.8±0.08	-	-	1	25.0
Bulk density (kg/m ³)	2668±18	2666±12	0.06	2 660	-0.3
Vp (m/s)	4620±163	4525±139	2.0	4445	-3.8
Mercury intrusion porosity (%)	0.44	0.62	40.9	1.01	129.5
Microporosity < 5 μm (%)	0.31	0.48	54.8	0.32	3.2
Macroporosity > 5 μm (%)	0.13	0.14	7.7	0.69	430.8

1994) (Figures 2 and 3A), where the stone was extracted manually from the surface (to depths of approximately 1-1.5 m), have been located around Alpedrete and surrounding villages. The type of quarrying conducted varied depending on the period. Tors or whale-back boulders were extracted first, and once that resource was depleted, deeper quarrying was undertaken. The largest volumes of stone were extracted from the quarries at El Berrocal and Alpedrete (Figure 2). Beginning in the 1980s, as a result of their inability to adapt to new environmental regulations, many of the small traditional quarries have been closing.

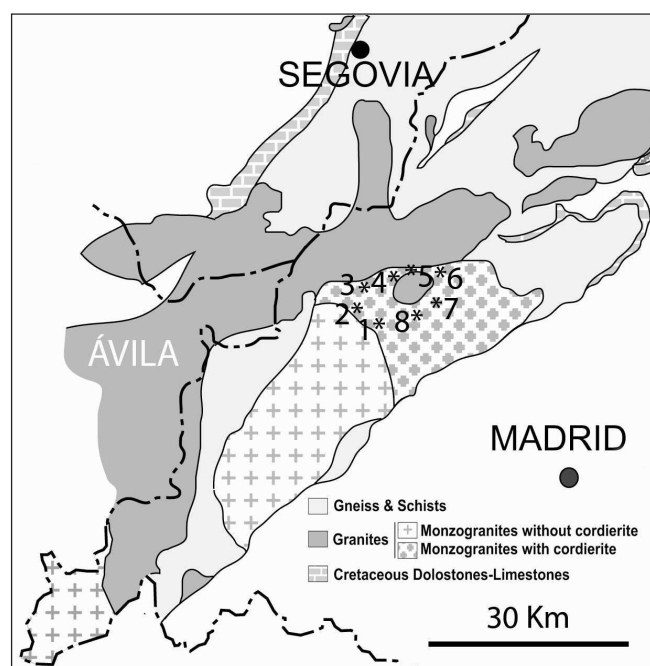


Figure 2. Location of the historic Alpedrete granite quarries: (1) Alpedrete, (2) Collado Mediano, (3) Becerril de la Sierra, (4) Mataelpino, (5) El Boalo, (6) Cerceda, (7) El Berrocal, (8) Moralarzar (modified after Fort et al., 2013a).

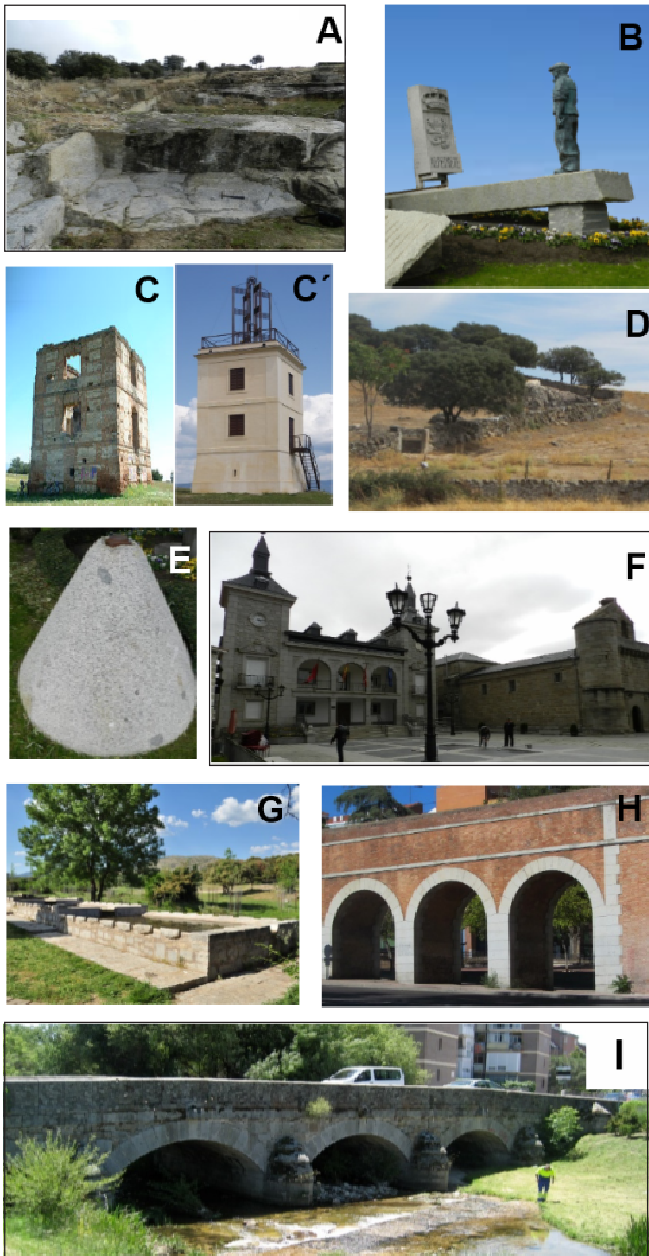


Figure 3. (A) *Alpedrete historic quarry, front*, (B) *Monument to the quarryman, Alpedrete*, (C) *Optical Telegraph Tower at Collado Mediano before conservation-restoration works*, (C') *After conservation-restoration works*, (D) *Typical granite boundary wall in Alpedrete*, (E) *Cone for crushing olives*, (F) *City Hall, Alpedrete (1959)* and *Asunción de Nuestra Señora Church (12th-13th centuries)*; (G) *Washing place, Alpedrete*, (H) *Amaniell aqueduct*, (I) *Rosario Bridge, second half of 17th century*.

One quarry at Alpedrete whose operations can be traced back for over 100 years is still active. Its 6000-m³ yearly outputs guarantee the supply of dimension stone.

Historic use

The Neolithic dolmen at Entretérminos between Alpedrete and Collado Villalba, whose remains are still standing was one of the first structures in which Alpedrete granite was used as a building stone.

Part of a Roman granite building is preserved at the El Beneficio-Miaccum archaeological site in Collado Mediano. No monumental works were built during the Visigoth period (4th-8th centuries) or none has survived (Menduiña and Fort, 2005). The Muslim era was characterised by the development of materials such as brick and the reuse of the stone from Roman buildings. It was not until the Christian reconquest of Toledo in 1085 that Churches started to be built in central Spain (Figure 3F) with, among other materials, Alpedrete granite. Since building materials were sourced from nearby locations during the Middle Ages (8th-15th centuries), Alpedrete granite was used in the entire area. Widespread use of *pedra Berroqueña* began after King Philip II moved the court to Madrid in 1561. Quarrying was nonetheless most intense at the time in the area around Zarzalejo, SW of Alpedrete, which while forming part of the same pluton (Villaseca et al., 2012), is characterised texturally by larger grain size and mineralogically as a different stone lacking cordierite. It was not until the 18th century that Alpedrete granite became the stone most widely used in and around Madrid and when most of Alpedrete area quarries started to work (Fort et al., 2011). This material was used in many works during the reign of Charles III (1759-1788). It was used to cobble stone avenues and lay gutters, as well as to build monuments such as Madrid's Royal Palace (Figure 4A), Alcalá Gate (Figure 4B), Artichoke Fountain, Prado Museum (Figure 4D) and hospitals such as the one presently bearing the name Queen Sofia. One of the most prominent monuments outside Madrid is the Guadarrama (or Rosario) Bridge (Figure 3I). In the 18th and 19th centuries, Alpedrete granite was generally used in conjunction with the Colmenar limestone quarried in the Madrid basin (Fort et al., 2014), yielding the grey stone - white stone contrast so typical of Madrilenian architecture (Figures 4A, 4B, 4D, 4J and 5F).

The mid-19th century construction of the Isabel II Canal that carries water to Madrid from the *Sierra de Guadarrama* spurred activity in the Alpedrete area quarries, whose granite was in constant demand to build waterworks (Unceta, 2005) in Madrid such as the Amaniell aqueduct (Figure 3H). Likewise in the 19th century, Alpedrete granite was used in the new city quarters built to accommodate Madrid's expansion. To meet the strong demand, for 73 years (1883-1956), an 11-km railway line (Aranguren, 1990) operated exclusively to ship Alpedrete granite from El Berrocal (where granite from the nearby Moralzarzal, Becerril de la Sierra, Cerceda and El Boalo quarries was loaded onto trains) to Collado Villalba (Figure 2). From there it was hauled to Madrid together with granite from other nearby quarries, simplifying and lowering the cost of transport.

With the founding in 1914 of the Sociedad de Sacadores de Piedra de la Sierra (society of stone extractors), whose membership included most of the quarrying villages, and the Sociedad Construcciones Hidráulicas y Civiles (Hydraulic and Civil Construction Society), Alpedrete became the area's leading building stone producer. With the return of the quarries to individual management when these two societies disappeared in 1925, output declined.

Work in the quarries was suspended during the Spanish Civil War (1936-1939). While Alpedrete granite resisted the ravages of war, the bullet holes are visible on the ashlar in some of Madrid's heritage buildings (Figure 4I).

In the 1940s and 1950s, Alpedrete granite was used to rebuild Madrid and, along with other types of granite, the 'Valle de los Caidos' (Valley of the Fallen) monument. The output of Alpedrete granite rose in the 1960 showing boom, driven by Madrid's rapid population growth.



Figure 4. Monuments built with Alpedrete granite. (A) Façades, Royal Palace at Madrid, (B) Alcalá Gate, (C) Portal, San Nicolás de los Servitas Church, (D) Façade, Prado Museum, (E) Bank of Spain, (F) Chimney, Royal Palace at Aranjuez, (G) Detail of window ornament, (H) Façades, Cervantes Institute, (I) Ashlars damaged by bullets during the Spanish Civil War, (J) Surface scaling on enclosure wall, (K) Ashlars soiled by graffiti.

Today this stone is used primarily in flooring (García del Cura et al., 2008). Other uses include cobblestones, funeral art, and building and monument restoration and rehabilitation across the region of Madrid. The Bank of Spain, rehabilitated in 2003, is but one example (Figure 4E).

Heritage issues

Many of the surnames of the inhabitants of Alpedrete and surrounding quarrying villages can be traced back to other quarrying areas in northern Spain. Because of the huge demand for Alpedrete granite, many workers from the north migrated to the mountains around Madrid to work in the quarries there.

Examples of Alpedrete granite in industrial heritage include grinding stones for flour mills, cones to crush olives (Figure 3E) and

mining infrastructure in the former silver mine at Moralarzaral (Soto, 2011). Along with brick masonry and granite rubble, Alpedrete granite is one of the materials that was used to build the grid of optical telegraph towers (1844). An Alpedrete granite tower has been conserved at Collado Mediano, although the 2008 restoration concealed the original masonry bond (a mix of brick and coursed rubble masonry) (Figures 3C-C'). Many examples of traditional rural architecture are also well preserved, including sheds, washing places (Figure 3G), drinking troughs, irrigation canals and boundary walls (Figure 3D). The Alpedrete granite-related heritage has been turned to value in the form of Geomonumental routes (<http://www.madrimasd.org/English/Science-Society/scientific-heritage/Geomonumental-Routes/default.asp>), a platform that introduces the general public to the geological characteristics and cultural value of buildings bearing Alpedrete granite. These socially beneficial activities

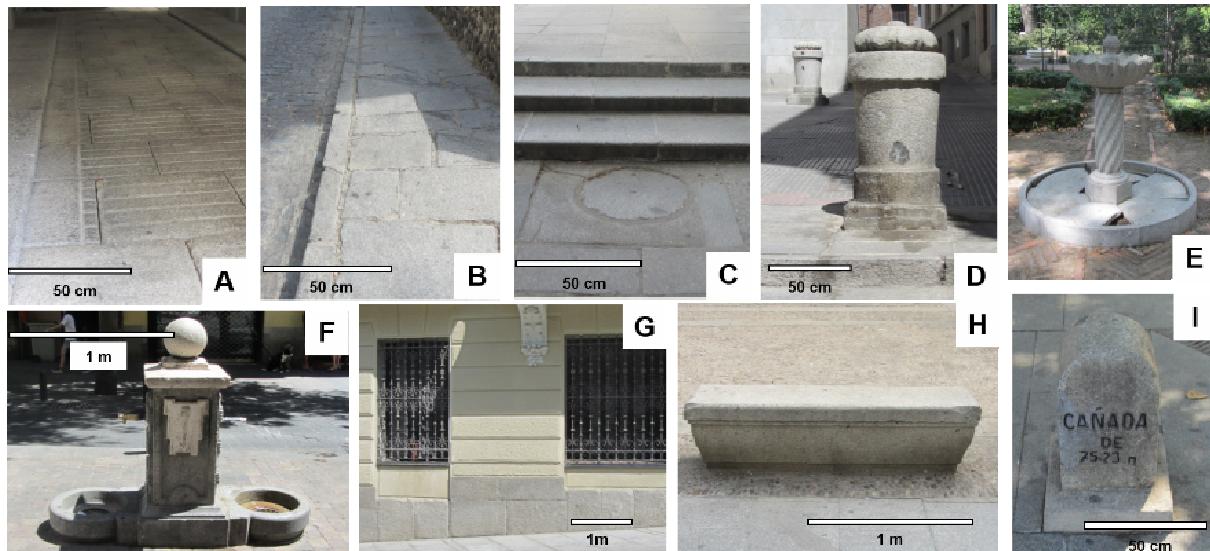


Figure 5. *Alpedrete granite on Madrid streets and thoroughfares: (A) Walkways, kerbs and carriageway, (B) Walkway, curb and cobblestones, (C) Staircase, street paving and sewage system cover, (D) Spur stone with nodule, (E) Ornamental fountain, (F) Functional fountain (Alpedrete granite and Colmenar limestone), (G) Dado on traditional building, (H) Bench, (I) Milestone on cattle route, Madrid.*

have been conducted on site in recent years in the framework of Madrid's Science Week.

Buildings

Alpedrete granite is found in 75% of Madrid's cultural heritage assets. It was also used in nearly all heritage industrial buildings, housing in the city's traditional quarters, indoor sit was used in steepers of stairs, chimneys and outdoors, in dados or window frames, walkways, statues, fountains, milestones and urban furniture (Figures 4 and 5). Table 1 lists the most representative monuments built with Alpedrete granite, together with other types of building stone (Fort et al., 2002; Gómez-Heras and Fort, 2004).

Alpedrete granite vulnerability and maintenance

Thanks to its petrological and petrophysical characteristics, Alpedrete granite is highly resistant to the agents of decay (and consequently durable), usable with a variety of finishes and readily cleaned.

Pre-quarrying decay, gloss (micro-roughness), finish and position on buildings, however, condition the type of maintenance or cleaning required. The method used should not roughen the granite surface and special care should be taken in aged *pedra Rubia* quarried from very shallow tors where the feldspars and micas may have been significantly altered by the action of fluids and concomitant hydrolysis. In this process, potassium feldspar is replaced by kaolinite, plagioclase is converted to sericite and chloritization of biotite. Hydrolysis may also release iron from biotite. Cordierite alteration, in turn, yields pinite or micaceous clusters that decay more quickly, although cordierite is only rarely present in Alpedrete granite (Fort et al., 2013).

Suitability

The low anisotropy, capillary water absorption, porosity and high mechanical strength and durability (Tables 4 and 5) characterising Alpedrete granite render the stone exceptionally moisture-resistant.

For that reason it has traditionally been used in pedestals, dados (Figure 5G) and building facades. Its scantily fractured outcrops are particularly suitable for carving very large columns and lintels (Figure 4). It is used not only in structural members, but also in ornamental elements, especially around doors and windows (Figures 4C, 4G), chimneys (Figure 4F), pinnacles atop buildings, and to make bollards. This stone has also been used for cobblestones (Figure 5B), walkway kerbs (Figures 5A, 5B) (Martín, 1994), manhole lids (Figure 5C), wells, spur stones (Figure 5D), retaining walls, corner protectors, decorative (Figure 5E) and functional (Figure 5F) fountains, benches (Figure 5H) and milestones (Figure 5I) that are present throughout Madrid.

As may be deduced from the foregoing, Alpedrete granite meets all the requisites for a GHSR nomination. Its designation would contribute to raising awareness of historic and modern features essential to its conservation, while furthering more efficient use of this dimension stone as a restoration material in the heritage monuments it was used to build.

Acknowledgements

This study was funded by the Community of Madrid under the GEOMATERIALS 2 project (S 2013/MIT-2914). The authors are members of the Complutense University of Madrid's Research Group: "Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio" (ref. 921349). The petrophysical assessments were run at the IGEO Petrophysical Laboratory, affiliated with the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM) Heritage Laboratory Network (RedLabPat). The assistance, input and support provided by laboratory technicians Carmen Vázquez and Blanca Gallardo are gratefully acknowledged.

Manuscript edited by Margaret Clark, professional translator and English language science editor.

References

Aidico 2012 Informe Sectorial de la Piedra Natural en España 2012,

- Observatorio del mercado de la piedra natural. Instituto tecnológico de la Construcción.
- Aranguren, J., López Bustos, C. 1990, El ferrocarril de Villalba a El Berrocal: Carril, v. 29, pp. 43-51.
- Brandebourger, E., 1984, Les granitoides Hercynien stardifs de la Sierra de Guadarrama Systeme Central Espagne. Petrographieet-geochimie: PhD Thesis, Universite Lorraine, pp. 209.
- Cooper, B.J., 2010, Toward establishing a "Global Heritage Stone Resource" designation: Episodes, v. 33, no. 1, pp. 38-41.
- Cooper, B.J., Marker B.R. and Thomas I.A., 2013a, Towards International Designation of a Heritage Dimension Stone: Key Engineering Materials, v. 548, pp. 329-335.
- Cooper, B.J., Marker, B.R., Pereira, D. and Schouenborg, B. 2013b, Establishment of the "Heritage Stone Task Group" (HSTG): Episodes, v. 36 no. 1, pp. 8-9.
- EN 12370:1999, Natural stone test methods, Determination of resistance to salt crystallisation. AENOR (Spanish Association for Standardisation and Certification), 10 pp.
- EN 12371:2011, Natural stone test methods, Determination of frost resistance, AENOR (Spanish Association for Standardisation and Certification), 16 pp.
- Fort, R., Bernabéu, A., García del Cura, M.A., Ordoñez, S., López de Azcona, M.C. and Mingarro, F., 2002, Novelda Stone: a stone widely used within the Spanish architectural heritage, *Materiales de Construcción*, 52, 266, pp. 19-32.
- Fort, R. Alvarez de Buergo, M., Mingarro Martín, F., López de Azcona, M.C., 2004, Stone decay in 18th century monuments due to iron corrosion. *The Royal Palace, Madrid (Spain): Building and Environment*, v. 39, pp. 357-364.
- Fort, R., 2008, La Piedra Natural y el Patrimonio construido: Un mismo campo de investigación: *Mater. Construcc*, v. 58, no. 7-10, pp. 289-290, ISSN: 0465-2746.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., Varas M.J., 2010, Characterisation of monzogranitic batholiths as a supply source for heritage construction in the northwest of Madrid: *Engineering Geology*, v. 115, pp. 149-157.
- Fort, R., Varas M J, Alvarez de Buergo, M. and Freire-Lista, D.M., 2011, Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone: *Journal of Geophysics and Engineering*, v. 8, pp. 132-144.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M., Varas-Muriel, M.J. and Freire-Lista, D.M., 2013, Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 46, pp. 421-429.
- Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E., 2014, Colmenar Limestone, Madrid, Spain: considerations for its nomination as a Global Heritage Stone Resource due to its long term durability Global Heritage Stone: Towards International Recognition of Building and Ornamental Stones: Geological Society of London. Special Publications, v. 407, fist published online September 3. 2014. doi: 10.1144/SP407.8.
- Garcíadel Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A., Martínez-Martínez, J., 2008, The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers: *Materiales de Construcción*, v.58, no. 289-290, pp. 65-79.
- Gómez-Heras, M., 2005, Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico: Phd Thesis, Univeridad Complutense de Madrid, pp. 339.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J., Fort, R., 2008, Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty: *Environmental Geology*, v. 56, pp. 547-560.
- Hughes, T., Lott, G.K., Poultney, M.J. and Cooper, B.J., 2013, Portland Stone: A nomination for "Global Heritage Stone Resource" from the United Kingdom: Episodes, v. 36, n. 3, pp. 221-226.
- Llorente Pinto, J.M., 2011, El valor indicador de los topónimos. El caso de la voz berrocal y sus variantes: *Asociación de Geógrafos Españoles Bulletin*, v. 56, pp. 50-77.
- López-Arce, P., Varas-Muriel, M.J., Fernández-Revuelta, B., Álvarez de Buergo, M., Fort, R. and Pérez-Soba, C., 2010, Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: Surface roughness quantification: *Catena*, v. 83, pp. 170-185.
- López-Arce, P., Fort, R., Gómez-Heras, M., Pérez-Monserrat, E., and Varas-Muriel, M.J., 2011, Preservation strategies for avoidance of salt crystallisation in El Paular Monastery cloister, Madrid, Spain: *Environmental Earth Science*, v. 63 pp. 1487-1509.
- Martín Moreno, S., 1994, *Materiales Pétreos Tradicionales de Construcción en Madrid*. Phd Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, pp. 772.
- Menduiña, J., and Fort, R. (coordinadors), 2005, Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX. IGME-IGE, Madrid, pp.131.
- Muñoz Cebrían, J.M., 2003. Fenómenos biogeoquímicos de las piedras monumentales: Biblioteca Nacional y Museo Arqueológico Nacional de Madrid: *Ingeniería Civil*, v. 129, pp. 103-110.
- Pérez, P.P., Navarro, J.V., Sánchez, A., 2008, Incidencia del empleo de morteros de azufre en edificios del siglo XIX: daños producidos en la valla perimetral de la Biblioteca Nacional y del Museo Arqueológico Nacional. *Bienes culturales: Instituto del Patrimonio Histórico Español Journal*, v. 8, pp. 167-180.
- Pérez-Monserrat, E.M., Fort, R., 2004, Caracterización y procedencia de la sillería granítica del convento de la Encarnación, Madrid: *Geotemas*, v. 6, no.1, pp. 89-92.
- Pérez-Monserrat, E.M., Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Varas, M.J., 2008, Rutas Geomonumentales: La Geología para la enseñanza y difusión del patrimonio arquitectónico: *Tierra y Tecnología*, v. 33, pp. 39-46.
- Pérez-Monserrat, E.M., Fort González, R., Álvarez de Buergo, M., Varas-Muriel, M.J. and Gómez-Heras, M., 2013, Los materiales pétreos utilizados en la obra de Antonio Palacios como apuesta para la conservación del patrimonio geológico: *Tierra y Tecnología*, v. 43, pp. 28-34.
- Pérez-Monserrat, E.M., Alvarez de Buergo M, Gómez-Heras M, Varas Muriel M.J., Fort, R., 2013, An urban geomonumental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain: *Environ Earth Sci.*, v. 69, pp. 1071-1084.
- Soto Caba, M.A., 2011, Las minas de plata de Moralarzal (comunidad de madrid) en los siglos XVI y XVII: *De Re Metallica*, v. 16, pp. 11-19.
- Unceta, M., Echenagusia, J., 2005, Madrid: la sierra del agua: guía turística del Canal de Isabel II: Santillana Ediciones generales. El País/Aguilar, pp. 220.
- Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M. and Fort, R., 2007, The Influence

- of past protective treatments on the deterioration of historic stone façades. A case study: *Studies in Conservation*, v. 52, pp. 110-124.
- Villaseca, C., Barbero, L., Rogers, G., 1998, Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints: *Lithos*, v. 43, pp. 55-79.
- Villaseca, C., Herreros, V., 2000, A sustained felsic magmatic system: the Hercynian granitic batholith of the Spanish Central System: *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, v. 91, pp. 207-219.
- Villaseca, C., Bellido, F., Perez-Soba, C. and Billstrom, K., 2009, Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt: *Mineralogy and Petrology*, v. 96, pp. 197-211.
- Villaseca, C., Orejana, D., Belousova, E.A., 2012, Recycled metaigneous crustal sources for S- and I-type Variscan granitoids from the Spanish Central System batholith: Constraints from Hf isotope zircon composition: *Lithos*, v. 153, pp. 84-93.



David Martín Freire-Lista holds a degree in Geological Sciences from the University of Oviedo (2001) and a Máster in Environmental Geology and Geological Resources from the Complutense University of Madrid (2010). His research focusses on petrophysics, having worked at the Universidad de Oviedo (2000), Universidad Federal de Minas Gerais (Brasil) (2000-2001), Bureau of Economic Geology (University of Texas, Austin) (2004). Presently he is contracted through the International Programme for Attracting Talent (PICATA of the Campus of International Excellence of Moncloa).



M. José Varas-Muriel is Lecturer at the Complutense University of Madrid (UCM). She has been working in the field of Geology applied to monumental stone since 1996 and she is a member of the Heritage Conservation Group at the Geosciences Institute (IGEO, CSIC-UCM) since 2001. She now lectures Applied Petrology and Geology at the School of Geology, Complutense University, Madrid.



Rafael Fort González. BSc. in Geological Sciences (1979) and PhD in Economic Geology (1985) from University Complutense of Madrid (UCM). Since 1987, Senior Scientist at (Spanish Council for Scientific Research, CSIC). Since 2006, - Head of the research group, from CSIC-UCM, "Applied Petrology for Heritage Conservation". Research interests on: Buildings materials characterization (stone, bricks, mortars, etc.); quality and durability of stony materials. Conservation treatments, materials provenance: historic quarries.

6.10 Nomination of Zarzalejo granite, a Spanish heritage building stone, as a “Global Heritage Stone Resource”

Energy Procedia, 76: 642-651.

Freire Lista, D.M., Fort, R. y Varas-Muriel, M.J.

El granito de Zarzalejo es un monzogranito que se extrae en las estribaciones de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español) de la Comunidad de Madrid (España). Presenta unas excelentes propiedades petrofísicas y de durabilidad para ser utilizado en construcción. Por sus cualidades y su uso durante siglos en la construcción de edificios tan emblemáticos en la provincia, como el Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial (declarado Patrimonio Mundial de la Humanidad), supone un candidato idóneo para ser nominado como recurso pétreo del patrimonio mundial, de ahí que se presentase su candidatura en el congreso de la European Geosciences Union de 2014.

Este aspecto repercutirá ventajosamente en la economía de la Sierra de Guadarrama, con una importante tradición cantera. Actualmente, se comercializa como Gris Escorial y se exporta por todo el mundo. En este trabajo se analizan las propiedades petrofísicas, durabilidad así como su valor patrimonial.

European Geosciences Union General Assembly 2015, EGU

Division Energy, Resources & Environment, ERE

Nomination of Zarzalejo granite, a Spanish heritage building stone, as a “Global Heritage Stone Resource”

Freire-Lista, D. M.^{a,b,*}, Fort, R.^{a,b}, Varas-Muriel, M.J.^{a,b,c}

^a*Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM) Spanish Research Council CSIC – Complutense University of Madrid UCM. Madrid 28040, Spain*

^b*CEI Campus Moncloa, UCM-UPM and CSIC, Madrid 28040, Spain*

^c*Facultad de CC. Geológicas. Complutense University of Madrid UCM. Madrid, 28040, Spain*

Abstract

As a stone with excellent petrophysical properties and proven durability, granite from Zarzalejo, Spain, is particularly suitable for construction. Its high quality and use over the centuries to build monuments such as the Monastery of El Escorial, listed as a UNESCO World Heritage Site, make it an ideal candidate for designation as a Global Heritage Stone Resource. That distinction would have a very favourable impact on the economy of a region where quarrying has long been a traditional way of life. This granite is quarried in the Spanish Central Range and marketed around the world today as “Blanco Rafaela”.

© 2015 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the GFZ German Research Centre for Geosciences

Keywords: granite; building stone; petrophysic properties; durability; heritage; Piedra Berroqueña.

* Corresponding author. Tel.: +34 913 944 903; fax: +34 915 425 353.

E-mail address: d.freire@igeo.ucm-csic.es

1. Introduction

Zarzalejo granite is quarried in the Guadarrama Mountains (Central Range) in the Spanish province of Madrid by [1]. This mountainous granite pluton, located 60 km northwest of Spain's capital city (figure 1), is home to Zarzalejo, Robledondo, Robledo de Chavela, Navagamella and El Escorial. The granitic landscape that surrounds these villages is dotted with historic quarries.

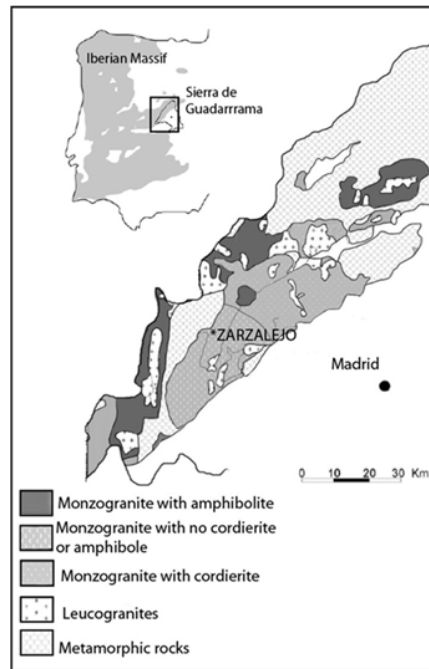


Fig. 1. Zarzalejo village location. After Fort et al., 2013.

The rich legacy left by Zarzalejo granite, used as a building material since pre-Roman times, must be preserved for future generations. The single quarry in operation at this writing has a yearly output of 762 m³, exported primarily to Italy and Germany under the trade name “Blanco Rafaela”.

This dimension stone has been one of the pillars of the regional economy for centuries and the source of an invaluable tangible and intangible cultural heritage in Madrid and its surrounds.

The intangible heritage includes festivities in honour of St Peter, still very popular in Zarzalejo, whose patron saint's name derives from the Latin *petrus*, meaning rock. Traditional techniques such as quarry-side stone extraction and cutting, other heritage elements, should be conserved to supply the granite used in restoration [2]. The history of traditional modes of transport, by oxen and later railway [3] and lorries, likewise merits conservation.

Scientific papers have been written on the petrophysical properties [4], durability [5] and effects of finishes [6] on Zarzalejo granite, along with literary texts [7] and essays on its use in sculpting [8], among others.

Zarzalejo granite also forms part of the region's tangible industrial heritage as the material used in mills, millstones, water deposits, country walls, washing places and, last but not least, the shoeing frames that stand as reminders of a not-so-distant past when granite was transported on ox-drawn carts. “Herrerian balls”, in turn, pinnacles carved and set in place with tools and techniques traditionally used in villages and rural areas, contribute to Madrid's artistic heritage.

Zarzalejo stone is also widely represented in the architectural heritage, from religious buildings to palaces, theatres and bridges [4]. Perhaps most prominently, it was the main building material used in the region known historically as

“El Escorial, monastery, site and natural and cultural surrounds”, listed as a cultural heritage asset by the Region of Madrid (Decree 52/2006).

War and the need for trenches and bunkers have also driven the use of Zarzalejo granite, adding to its tangible legacy. Moreover, part of Madrid’s sculptural heritage and many modern works have been carved out of this granite. The monument to the quarryman at Zarzalejo, a tribute to the village’s traditional trade, is a typical example.

The Global Heritage Stone Resource (GHSR) designation [9, 10], an initiative of the International Union of Geological Sciences’ Heritage Stone Task Group (HSTG) [11] and International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission C-10, Building Stone and Ornamental Rock, “seeks international recognition for natural stone resources that have achieved widespread utilisation in human culture”.

The present article describes traditional and modern Zarzalejo granite quarries and their surrounds, along with stone history and usage, initially in the region of Madrid and presently around the world. The ultimate aim is a GHSR designation for the stone and its location on the grounds of local tradition, built heritage, and the granite’s petrographic properties, petrophysics and durability.

Zarzalejo granite has left its mark on the works where it was used [12]. Its colour is characteristic of streets and buildings in Madrid [3] and of many villages in the region. The building materials and machinery used to build San Lorenzo de El Escorial Monastery are on display in the monument’s architectural museum. The use of other granites as replacement or building stone has an adverse effect on this World Heritage Site and hence on international culture. The local (Zarzalejo) granite has not been used in the most recent public works involving the monastery. The cobblestones on the surrounding streets, for instance, are being replaced with La Cabrera granite (North Madrid). The village auditorium is made of Albero granite, from northwestern Spain. In other villages, such as Zarzalejo, municipal ordinances require all building façades to bear at least 40 % local stone.

The GHSR designation would help towns and cities conserve the patrimonial relationship between their historic cores and their environs and, through action taken by authorities at every level, from local to international, enhance social awareness of the importance of building materials in human heritage.

1.1. Zarzalejo granite petrography

Two texturally different units can be distinguished in the Zarzalejo pluton: a grey, relatively equigranular unit with medium- to coarse-grained crystals, and a porphyritic unit characterised by the presence of K-feldspar megacrysts in a medium-grained matrix. Mafic microgranular nodules and darker, usually sub-rounded or ellipsoid xenoliths denote the existence of tonalite in its composition [15]. These nodules afford Zarzalejo granite its distinct identity.

This stone has a typically holocrystalline hypidiomorphic granular texture [16]. Its main components are quartz, plagioclase, potassium feldspar and biotite (figure 2a). Muscovite may appear as a secondary or accessory mineral, along with a number of micaceous microcrystalline clusters indicative of cordierite transformation.

Zarzalejo granite consists primarily of an intermediate composition plagioclase associated with orthoclase, microcline and quartz. Its subhedral alkaline feldspar is also associated with intermediate plagioclase and quartz in irregularly shaped interstices. Perthites and sericitised plagioclase are common [16].

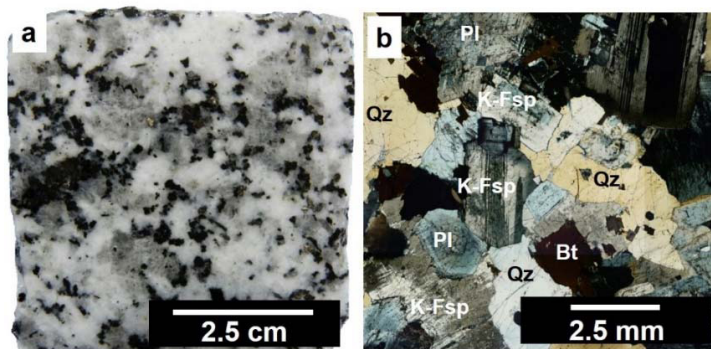


Fig. 2. (a) hand sample of Zarzalejo granite; (b) polarised crossed nicols micrograph of Zarzalejo granite

1.2. Chemical composition

The chemical compositions [17, 4] of the stone on monuments built with Zarzalejo granite (samples 1-4) and the freshly quarried material from Valdemorillo (sample 5) are given in Table 1.

Table 1. Average chemical composition of Zarzalejo monzogranite

Major elements %	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
SiO ₂	68.97	68.77	69.21	68.59	70.1-
TiO ₂	0.55	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	15.17	15.74	15.66	14.69	15.4
Fe ₂ O ₃	3.26	-	-	-	-
FeO	1.11	-	-	-	-
MnO	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04
MgO	1.19	0.88	0.89	1.16	0.82
CaO	2.47	2.31	2.65	2.51	2.41
Na ₂ O	3.21	3.3	3.43	2.82	3.05
K ₂ O	4.07	3.94	3.72	4.17	4.09
P ₂ O ₅	0.131	0.22	0.27	0.37	0.19

1.3. Colour

Zarzalejo granite is characteristically grey, with slight variations in shade. The CIELAB scale (1976) (L* lightness, colour coordinates a* and b*) and the whiteness (WI) and yellowness (YI) indices defined in ASTM standard E313-73 were used to quantify the colour (Table 3).

Table 2. Average colour coordinates of Zarzalejo monzogranite.

Colour parameters	Value	Colour indices	Value
L*	69.3±5	YI	5.8±2.26
a*	-0.4±0.5	WI	30.4±6.53
b*	3.1±1.25		

1.4. Petrophysical properties

Zarzalejo granite owes its good performance as a building material to its petrophysical properties [4, 16, 17, 18], described in the literature as summarised in Table 3. Petrophysical values define an isotropic granite (low total anisotropy), dense with low porosity and water absorption capacity, which is resistant and durable in extreme climates.

Table 3. Petrophysical properties of Zarzalejo granite

Property	Value	Property	Value
Impact strength (cm)	58.8 ^[18]	Capillary absorption coefficients (g·m ⁻² ·s ^{-0.5})	4.238 to 4.796 ^[19]
Compressive strength (MPa)	160,0 ± 49.0 ^[18]	Porosity accessible to water (%)	1.7±0.06 ^[5]
Flexural strength (MPa)	8,21 ± 2.25 ^[18]	Hg intrusion porosimetry (%)	1.4 ⁽⁵⁾
Bulk density (kg/m ³)	2 657±15 ^[5]	Frost resistance (%)	0.005 ^[18]
Young's modulus (MPa)	2 6882 ^[5]	Ultrasonic P-wave velocity (m/s)	3 219 ±204 ^[4]
Water absorption (%)	0.6 ^[19]	Ultrasonic S-wave velocity (m/s)	2 2116 ±89 ^[4]
Water saturation (%)	1.24 ^[5]	Total anisotropy (%)	12.7 ^[4]

2. Historic use of Zarzalejo granite

Machota Chica (40°32'10.3"N, 4°09'49.9"W) was the area most intensely quarried in the past. Today these historic quarries have been given a new use (figure 3a). A ramblers' path now crosses the area, where columns, remains of ashlar and hewn stone that were to be used to build El Escorial Monastery can still be seen. Other paths lead to the Chair of Philip II (Figure 3b-c), a prominent tourist landmark hewn in Zarzalejo granite. A quarry or open museum is in the planning, to be sited at Guijo Lookout.

Zarzalejo granite is found on countless historic buildings [20] in the form of dados, coats of arms, door and window frames, balconies and ashlar. It has also been used in walkway pavers [6], cobblestones, manhole lids and staircases. Urban furniture such as fountains (figure 3d), spur stones and benches and other elements including city walls (figure 3e) and roadside stone crosses (figure 3f) have been built with this granite, alone or combined with traditional or modern building materials. In buildings it has been used in walls in the form of ashlar or rubble stone, as well as in lintels and columns.

Zarzalejo granite was generally used in conjunction with the Colmenar limestone quarried in the Madrid basin [21], and with Alpedrete granite [22], yielding the grey stone - white stone contrast so typical of Madrilenian architecture.

Table 4 lists the works built with Zarzalejo granite throughout history. It was used by the Romans, as attested to by the Roman road conserved at Zarzalejo (figure 3g) and tombstones found between El Escorial and Navalquejigo (National Archaeological Museum, Madrid). The Arabic defence tower at Fuentelámparas was built with Zarzalejo granite. This watchtower, remains of which are still standing, was used as a stronghold as late as the Spanish Civil War (1936-1939) (figure 3h).

The Christian conquest and re-population of the area after the twelfth century prompted a rise in the use of Zarzalejo granite to build fortified churches (such as Nuestra Señora de la Estrella Church at Navalagamella). The area is also rife with rural heritage in the form of shoeing frames, country walls, mills and millstones (figure 3i), fountains, water pipes and deposits (figure 3j). The eighteenth century "Caño Viejo" (old water pipe) fountain and the "Caño Nuevo" (new water pipe) fountain, dating from 1850, both at Zarzalejo, are among the highlights. Rural buildings such as schools, railway stations, town halls, and members and elements including walls, balustrades and "Herrerian balls" (figure 3k) also form part of the local identity.

The most representative buildings constructed with this granite are San Pedro Apóstol Church at Zarzalejo (figure 3m), built in 1492 and reformed in 1619, and the Descalzas Reales Convent at Madrid (1559-1564) listed as a cultural heritage asset in 1994. Construction of the Royal Monastery at San Lorenzo de El Escorial (1563-1584) (Figure 3n) constituted a milestone in the proliferation of granite quarries and extraction due to the huge demand generated by this huge monument. At the time of its construction, what is now a UNESCO World Heritage Site was the largest building in Europe and for many years was reputed to be the eighth wonder of the world.

Other heritage buildings bearing this emblematic granite include Asunción de Nuestra Señora Church at Valdemorillo and Agustinas Recoletas de la Encarnación Convent at Madrid [15].



Fig. 3. (a) historic quarry at Zarzalejo; (b) chair of Philip II; (c) 100 pesetas bill with the Philip II chair image (d) fountain; (e) Fence; (f) roadside stone cross; (g) roman road conserved at Zarzalejo; (h) arabic defence tower; (i) millstones; (j) water deposit at San Lorenzo del Escorial; (k) herrerian ball; (m) San Pedro Apóstol church and festival at Zarzalejo; (n) Royal Monastery at San Lorenzo de El Escorial; (o) Valle de los Caídos monument; (p) courtyard armoury Royal palace at Madrid; (q) IFEMA fairgrounds at Madrid; (r) Salvador Dali's monoliths at Madrid; (s) addition to the national museum of modern art at Madrid.

Madrid's proximity and steady demand for granite was a key factor in the development of the quarrying industry [3]. In 1761 the use of Zarzalejo granite rose in the wake of an order by Charles III's court to pave all of the capital city's streets. The Marqués de la Ensenada census conducted in 1752 showed that the vast majority of Zarzalejo's population was employed that year in the extraction and transport of stone to Madrid. A geographic dictionary authored by S. Miñano, published in 1829 and later revised by P. Madoz, contained a reference to the prominence of Zarzalejo granite.

The 1863 institution of the railway station connecting Zarzalejo to Madrid was another milestone in the development of quarrying at Zarzalejo, for it lowered the price of granite [3]. With the construction of the capital city's east cemetery and its new slaughterhouse with the stone, both in 1910, and an order decreed in 1916 whereby this granite was to be used to pave the streets of Madrid, by 1920 output was higher in Zarzalejo than any other village in the Guadarrama Mountains.

Zarzalejo granite was used to build the "Nuevos Ministerios" building at Madrid. Quarrying stalled during the Civil War, although forts and bunkers built during that conflict are still standing (figure 3h). Production resumed in the

nineteen forties and fifties, albeit with ups and downs. The “Cooperativa Industrial de Canteros San Pedro” (San Pedro quarrymen’s cooperative society) was chartered at around that time, when granite was being used in the capital city and in works commissioned by the National Heritage and other official bodies. The village supplied stone to pave the outdoor courtyard on the El Escorial Monastery, build the Valle de los Caídos (Valley of the Fallen) monument (figure 3o) and restore Madrid’s Royal Palace after the Civil War. Zarzalejo granite was also used in the courtyard outside the palace armoury (figure 3p), to pave Madrid’s Plaza de Oriente and to rebuild Moncloa Palace (1953). After 1960 output rose substantially to meet the city’s high demand for granite pavers, kerbs and cobble stones.

Table 4. Representative monuments built with Zarzalejo granite with other types of stone.

Heritage works	Year built
Roman road, Caratrava, Cercedilla and Zarzalejo	Before 3rd century
Asunción de Nuestra Señora Church. Robledo de Chavela	15th-16th century
San Pedro Apóstol Church. Zarzalejo	1492 (reformed 1619)
Las Descalzas Reales Convent. Madrid	1559-1564
Royal Monastery at San Lorenzo de El Escorial	1563-1584
San Bernabé Church. El Escorial	1594-1597
Asunción de Nuestra Señora Church. Valdemorillo	1601
Agustinas Recoletas de la Encarnación Convent. Madrid	1611-1616
Agustinas Recoletas de Santa Isabel Convent. Madrid	1640-1667
San Isidro Collegiate Church	1673-1675
Caño Viejo Fountain. Zarzalejo	1768
Charles III Royal Coliseum. El Escorial	1770-1778
Prince Gabriel’s cottage. El Escorial	1771-1773
The Crown Prince’s cottage. El Escorial	1771-1775
Caño Nuevo Fountain. Zarzalejo	1850
Railway station. Zarzalejo	1863 (rebuilt around 1940)
Santa María la Real de la Almudena Cathedral. Madrid	1883-1993
East (La Almudena) Cemetery. Madrid	1877-1925
Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Madrid	1893-1897
Milagrosa Church	1900-1904
La Concepción Church	1902-1914
San Ramón Nonnato Church. Robledondo	1904 (restored 1945)
Municipal slaughterhouse. Arganzuela, Madrid	1910-1925
Nuevos Ministerios. Madrid	1933-1942
Valle de los Caídos (Valley of the Fallen) monument	1940-1958
Virgen de Gracia Hermitage. El Escorial	1945
Reconstruction of Moncloa Palace. Madrid	1953
IFEMA Fairgrounds. Madrid	1980
Salvador Dalí monolith. Madrid	1984
Campo de las Naciones shopping center. Madrid	1986
Plazuela de la Cruz Fountain. El Escorial	1994
Addition to the Museo y Centro de Arte Reina Sofía (national museum of modern art). Madrid	2001-2005

Some of the most significant recent works include the IFEMA fairgrounds (figure 3q), Salvador Dalí's huge monoliths in Madrid (figure 3r), the addition to the national museum of modern art (Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía) (figure 3s) and prominent office buildings such as the Mapfre (a national insurance company) headquarters. In Europe, it is used mainly in Italy and Germany, for use internally and externally in both public spaces and home dwellings.

All this built heritage merits conservation and should be turned to value. Designation as a GHSR would enhance the respect for the heritage value of Zarzalejo granite and reinforce the recognition of its aptness for use in restoration and de novo construction.

3. Zarzalejo granite durability

Zarzalejo granite is highly durable thanks to its good petrophysical characteristics (Table 3). Measure of its rate of decay can be investigated with the variations in its ultrasound velocity and hardness over time [4]. This rate of decay depends on the degree of pollution as well as micro-climatic and climatic conditions [23]. A 280-cycle freeze-thaw (FT) test was conducted on Zarzalejo granite as specified in European standard UNE-EN, 12371, 2001.

The physical weathering induced by the test prompted enlargement of the pre-existing microcracks and created others, which propagated along microstructural alterations [16] such as crystallographic flaws, orthogonal planes of cleavage, macles or pre-existing microcracks, affecting feldspars in particular. FT-induced decay is governed by primary porosity. The linear crack density (LCD) [24] of Zarzalejo granite before freeze-thaw testing and after 70, 140, 210 and 280 cycles [5] are shown in table 5.

Table 5. Lineal crack density (microcracks per millimeter)

Freeze-thaw test cycle number	LCD
0	1.2
70	1.58
140	3.02
210	3.8
280	3.94

Chemical weathering in this granite, determined by its chemical composition (Table 1), alters the minerals. The plagioclase nuclei were found to be the most vulnerable to decay [25]. Zoned plagioclase crystals have the largest number of microcracks in their nuclei [26]. Plagioclase sericitisation is minimal in Zarzalejo granite [16].

Decay in Zarzalejo granite in historic ashlar on buildings listed as World Heritage Sites adopts the form of loss of quartz crystals, potassium feldspar fragmentation and plagioclase alteration [24].

The circulation of liquids or air pollutants accelerates decay and induces soiling, with the formation of black crust, biodecay due to colonisation by micro-organisms [27], scaling, capillary water absorption and fractures, among others.

4. Conclusions

Zarzalejo granite, quarried in the region of Madrid and present in its tangible and intangible heritage, is exported world-wide. It is characterised by high density, low porosity, high V_p and excellent durability.

Weathering induces microcracking and the loss of surface crystals in Zarzalejo granite, favouring decay by chemical alteration. These processes affect its durability only minimally, however, for many a monument built with this material is still in good condition today, several centuries after initial construction. The approximate age of buildings can, in fact, be estimated from the degree of decay.

The restoration of heritage buildings with the original material would ensure conservation of the region's tangible and intangible heritage.

Designation of Zarzalejo granite as a GHSR would drive greater use of Zarzalejo granite in the region and further its commercialisation abroad, creating jobs in rural areas.

Acknowledgements

This study was funded by the Community of Madrid under GEOMATERIALS 2 project S2013/MIT-2914 and conducted by members of the Complutense University of Madrid's Research Group: "Alteración y Conservación de los Materiales Pétreos del Patrimonio" (ref. 921349). The authors wish to thank the Geological and Mining Institute of Spain for conducting the thermal shock tests. The petrophysical assessments were run at the IGEO Petrophysical Laboratory, affiliated with the Moncloa Campus of International Excellence (UCM-UPM) Heritage Laboratory Network (RedLabPat).

Manuscript edited by Margaret Clark, professional translator and English language science editor.

References

- [1] Villaseca C, Barbero L, Rogers G. Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of Central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints. *Lithos* 1998;43:55-79.
- [2] Shadmon A. Stone, an introduction. Intermediate Technology Publications; 1989; 140 pp.
- [3] Fort R, Alvarez de Buergo M, Pérez-Monserrat EM, Gómez-Heras M, Varas-Muriel MJ, Freire-Lista DM. Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 2013;46:421-429.
- [4] Fort R, Alvarez de Buergo M, Pérez-Monserrat EM. Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 2013;61:296-305.
- [5] Freire-Lista DM, Fort R, and Varas-Muriel MJ. Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology* 2015;113:40-51.
- [6] García del Cura MA, Benavente D, Bernabéu A. and Martínez-Martínez J. The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers. *Materiales de Construcción*, 2008;58(289-290):65-79.
- [7] Blasco Castiñeira S. La imagen literaria de El Escorial en el siglo XVIII Reflexiones sobre las fuentes del viaje ilustrado. *Cuadernos de Historia Moderna* 1991;12:167-182.
- [8] Von der Osten Sacken C. El Escorial, estudio iconológico, Xarai ed. Bilbao; 1984.
- [9] Cooper BJ. Toward establishing a "Global Heritage Stone Resource" designation. *Episodes* 2010;33(1):38-41.
- [10] Cooper BJ, Marker BR, Thomas IA. Towards International Designation of a Heritage Dimension Stone: Key Engineering Materials 2013;548:329-335.
- [11] Cooper BJ, Marker BR, Pereira D, Schouenborg B. Establishment of the "Heritage Stone Task Group" (HSTG): *Episodes*, 2013;36(1):8-9.
- [12] Fort R. La Piedra Natural y el Patrimonio construido: Un mismo campo de investigación. *Materiales de Construcción*, 2008;58(289-290):7-10.
- [13] Martínez de Pisón E, Ortega N. El paisaje: valores e identidades 2009. ISBN: 978-84-8344-154-1
- [14] Pérez-Monserrat EM, Alvarez de Buergo M, Gómez-Heras M, Varas Muriel MJ, Fort R. An urban geomonomental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain: *Environ Earth Science* 2013;69:1071-1084.
- [15] Pérez-Monserrat EM, Fort R. Caracterización y procedencia de la sillería granítica del convento de la Encarnación, Madrid. *Geotemas* 2004;6(1):89-92.
- [16] Freire-Lista DM, Gomez-Villalba LS, Fort R. Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes. *Periodico di mineralogia* 2015; 85:54-64.
- [17] López de Azcona MC, Fort González R, Mingarro Martín F. Conservation of the stone in Cibeles Fountain, Madrid (Spain): *Materiales de construcción* 2002;52:65-74.
- [18] Bernabéu A, Benavente D, Fort R, García del Cura MA, Martínez-Martínez J, and Mendiña J. Valoración petrofísica del granito de Zarzalejo (Sistema Central) para su utilización como piedra de pavimento en cascos históricos. 6º Reunión Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural. CSIC. Seville, Centro Nacional de Aceleradores 2004.
- [19] Fort R, Varas MJ, Alvarez de Buergo M, Freire-Lista, DM. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone: *Journal of Geophysics and Engineering* 2011;8:132-144.
- [20] Mendiña J, Fort R. (coordinators) Las piedras utilizadas en la construcción de los Bienes de Interés Cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX. IGME-IGE; 2005.
- [21] Fort R, Varas-Muriel MJ, Alvarez de Buergo M, Perez-Monserrat E. Colmenar Limestone, Madrid, Spain: considerations for its nomination as a Global Heritage Stone Resource due to its long term durability. *Global Heritage Stone: Towards International Recognition of Building and Ornamental Stones: Geological Society of London. Special Publications* 2014; 407:121-135.
- [22] Freire-Lista DM, Fort R, Varas-Muriel MJ. Alpedrete granite (Spain). A nomination for the "Global Heritage Stone Resource" designation. *Episodes* 2015;38 (2):1-8.
- [23] Halsey DP, Mitchell DJ, Dews SJ. Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 1998; 31:359-367.

- [24] Sousa LMO, Suarez del Rio LM, Calleja L, Ruiz de Argondona VG, Rey AR. Influence of microcracks and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology* 2005;77:153-168.
- [25] Svahnberg H, Piazzolo S. The initiation of strain localization in plagioclase-rich rocks: Insights from detailed microstructural analyses. *Journal of Structural Geology* 2010;32:1404-1416.
- [26] Catlos E, Baker C, Sorensen S, Jacob L, Çemen I. Linking microcracks and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: Evidence from the Salihli and Turgutlu plutons in western Turkey (Menderes Massif). *Journal of Structural Geology*, 2011;33:951-969.
- [27] De la Torre R, Sancho L, Horneck G, de los Ríos A, Wierzbos J, Olsson-Francis K, Cockell C, Rettberg P, Berger T, De Vera JP, Ott S, Martínez-Frías J, González-Melendi P, Mercedes-Lucas M, Reina M, Pintado A, Demets R. Survival of lichens and bacteria exposed to outer space conditions-results of the Lithopanspermia experiments. *Icarus* 2010;208:735-748.

7. Capítulo de libro “Letras”. Editorial La Librería

Los materiales de construcción del Barrio de las Letras, su historia y estado actual

David Martin Freire Lista

En: “Letras”. Ed. Nicolás Ferrando, J. y Sánchez Molledo, J.M. Editorial Tempora

7.1 Orografía y primeros caminos del arrabal

El actual Barrio de las Letras se asienta sobre suaves laderas erosionadas por los cauces de tres arroyuelos que desembocaban en el arroyo del Prado Viejo, paralelo al actual Paseo del Prado: Se trata del arroyo de Atocha, que nacía en la plaza de Antón Martín y discurría por la calle Atocha; el de las Huertas, que nacía en la calle del León y pasaba por las calles de Santa María, Costanilla de los Desamparados y Huertas; y finalmente el arroyo del Prado, que nacía en la plaza de Santa Ana y discurría por lo que hoy es la calle del Prado.

El fuero de Madrid de 1202 (Cavanilles) describe la zona como vaguadas con baldíos y huertas en las que con el paso del tiempo, se establecieron caminos desde la villa al santuario de Nuestra Señora de Atocha y al monasterio de San Jerónimo, construido en 1503. Estos caminos discurrían paralelos a los cauces de los arroyos. Su tránsito y la relación de la corte con los centros religiosos generaron el desarrollo urbano sobre las huertas y prados; debido a la ampliación de caminos así como la construcción de casas, hospitales y palacios que conservarán sus piedras originales desde el siglo XVI hasta nuestros días. La historia del Barrio de las Letras está, por tanto, tallada en muchos de los sillares de sus edificios.



Figura 1. Vista de la Calle de San Jerónimo y el Paseo del Prado con cortejo de carrozas hacia 1860. Colección Carmen Thyssen-Bornemisza.



Figura 2. Plano de Madrid realizado por Antonio Mancelli en 1622.

7.2 Piedras de construcción

Si observamos detenidamente los piedras de construcción utilizados en el Barrio de las Letras, veremos la huella de canteros que las tallaron con esmero. Los sillares se tallaban normalmente en las proximidades de la cantera (Shadmon, 1989) y eran transportados en carros tirados por bueyes hasta su destino, en donde se repasaba su talla y colocaban en los edificios cuidadosamente con palancas y poleas (Marcos y Bausa, 1879). Estos edificios suponen actualmente el patrimonio construido del Barrio de las Letras (Figura 3).

En general, la arquitectura tradicional madrileña cuenta con poca variedad de piedras de construcción. Ello es debido a que las reservas cercanas de este material son el granito de la Sierra, la caliza blanca de Colmenar de

Oreja (Fort et al., 2014) y la piedra de Redueña (Fort et al., 2013). Además, una orden del rey Fernando VI, prohibió el comercio de las piedras ornamentales en 1748. Los esfuerzos llevados a cabo para localizar canteras de piedra ornamental estaban destinados únicamente a la ornamentación del Palacio Real (Tárraga Baldó, 2009). “...se mantengan como propias y privativas de la fábrica del Real Palacio, y que ninguno de los que las han descubierto, abierto, ... usen de ellas, en todo ni en parte, aunque se les haya dado permiso o licencia y hayan presentado muestras en esta Intendencia”.

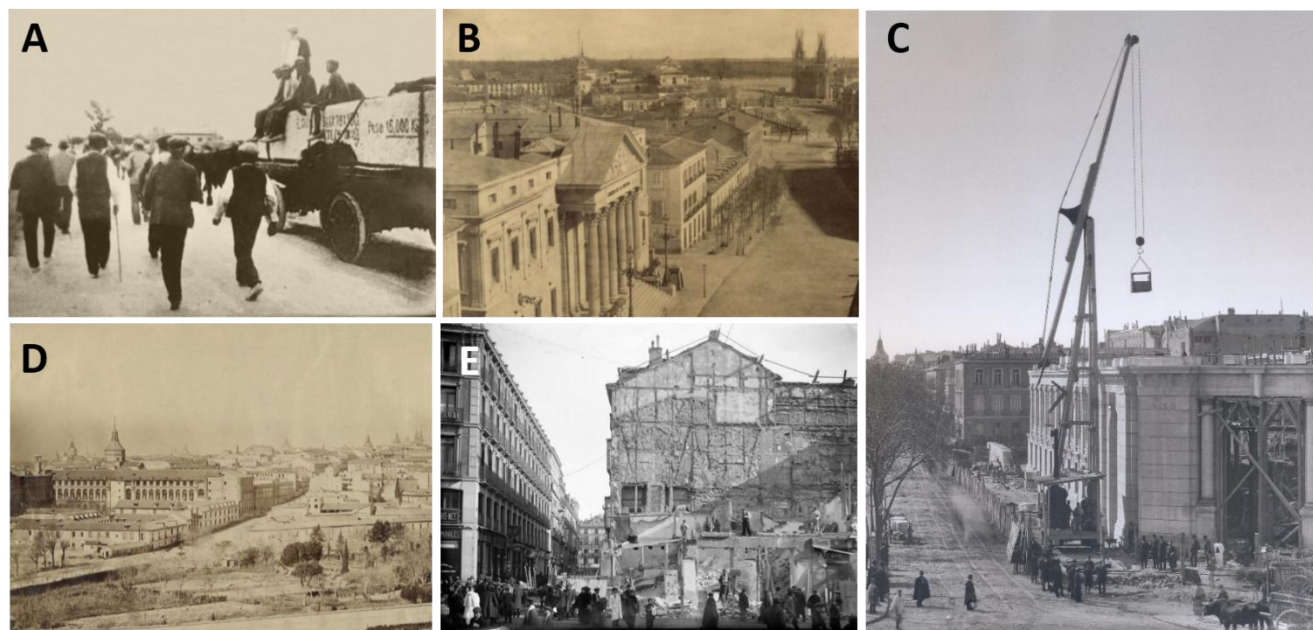


Figura 3.

- A: Caravana de bueyes transportando dinteles de granito de Alpedrete para la Corte Suprema de Madrid, hacia 1923.
 B: Calle carrera de San Jerónimo en 1853. Nótese que la fuente de Neptuno aún no se había trasladado a su ubicación actual, lo que se efectuó en 1898. En un principio estuvo situada en la plaza de la Lealtad, en el extremo del Prado de Apolo, mirando a Cibeles, a ras del suelo para permitir el uso de su agua por los madrileños.
 C: Construcción del Banco de España. Hacia 1886.
 D: Calle Atocha desde el Observatorio Astronómico en 1857
 E: Demolición para la construcción de la casa de Allende. Plaza Canalejas, 3. 1920.
 F: Paseo del Prado con la calle Carrera de San Jerónimo con palacio de Villahermosa. (Actual museo Thissen) y al fondo palacio Duques de Medinacelli. (Actual Hotel Palace).

Las piedras utilizadas en las primeras edificaciones del Barrio de las Letras eran las que se encontraban en las proximidades de la Villa, principalmente el sílex (Fort et al., 2013) proveniente de derribos de otras construcciones, como la muralla árabe. Esta piedra se forma por el reemplazamiento de calizas, procedía de formaciones del Terciario próximas a Madrid, y en algunos casos, era transportado por los ríos circundantes y depositado en las terrazas aluviales (Llugardo, B 1776)

Cuando este material comienza a escasear y se van desarrollando las vías de comunicación, se irá sustituyendo por piedras más lejanas, como la piedra Berroqueña, caliza de Redueña y la caliza de Colmenar de Oreja. (Fort

et al., 2013). El granito, denominado tradicionalmente piedra berroqueña (Llorente, 2011), procede de la Sierra de Guadarrama. Los primeros canteros lo extraían de las zonas de bolos graníticos superficiales, y a medida que la demanda de esta piedra crecía y los bolos se agotaban se empezaron a abrir frentes de explotación en canteras a cielo abierto. En las construcciones más antiguas se utilizaba la piedra Rubia, es decir, un granito de tonos amarillos, más alterado y cuya labra resultaba relativamente sencilla.

La piedra berroqueña fresca es de color gris (tradicionalmente se designaba como color cárdeno) y procedía de numerosas canteras ubicadas en la zona de Zarzalejo, en donde se desarrolló una economía ligada al granito a partir de la construcción del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, próximo a este pueblo (Margarot, 1772). Este granito se designa en términos geológicos como monzogranito de tamaño de grano medio-grueso.

La zona de Alpedrete y Moralarzal fue otra importante área de extracción de piedra berroqueña, sobre todo a partir de la construcción de una línea de tren que unía las canteras de El Berrocal con Villalba (Aranguren, 1990). Este granito se clasifica como monzogranito de tamaño de grano fino-medio (Fort et al., 2013) y fue utilizado para la construcción de la primitiva iglesia de las Trinitarias Descalzas en el Barrio de las Letras.

En la piedra berroqueña es frecuente la presencia de gabarros, tradicionalmente llamados negrones o manchones. Son enclaves, nódulos o concreciones esféricas de composición máfica de color gris oscuro (Gómez-Heras, 2008). Su origen puede ser debido a fragmentos de rocas encajantes que arrastra el magma granítico y a concreciones ligadas al proceso de solidificación del magma.

Otro importante centro de extracción de piedra berroqueña ha sido Colmenar Viejo. De esta localidad se extrajo un monzogranito de tamaño de grano medio. Utilizado además de para la construcción de edificios, también como material de adoquinado se va remplazando a partir de los años 20's del pasado siglo por pórfido diabásico, de menor tamaño de cristal y más resistente, también proveniente principalmente de diques de Colmenar Viejo, actualmente casi agotados.

La piedra berroqueña ha sido tradicionalmente muy utilizada en los edificios del Barrio de las Letras, formando parte de los zócalos, así como de dinteles y jambas de las puertas y ventanas (Cabello y la Piedra, 1901; Martín, 1994). En las calles se ha utilizado en adoquines, registros de alcantarilla, bolardos, bordillos y pedestales de estatuas.

La caliza blanca de Colmenar de Oreja es una biomicrita/biosparita, formada por bioclastos (caráceas, ostrácodos y gasterópodos) y un cemento que los aglutina (Figura 4). Ha sido utilizada para tallar elementos ornamentales en escudos, como el de la Real Academia de la Historia, o en el Palacio de los Duques de Ugena (Figura 5).

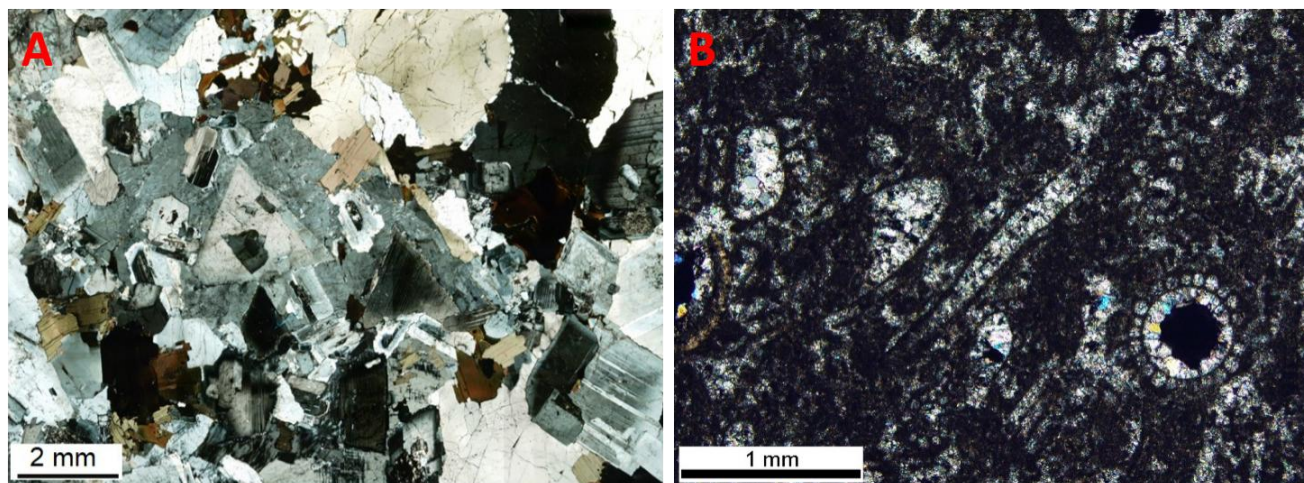


Figura 4. Aspecto al microscopio de luz polarizada.

A: Granito de Zarzalejo, en donde se pueden observar cristales de cuarzo (tonos blancos y claros) feldespato (colores grises) y biotitas (color marrón oscuro)

B: Aspecto al microscopio de la caliza de Colmenar de Oreja, en donde se pueden observar microfósiles, caráceas en secciones longitudinales y transversales. Cortesía Elena Mercedes Pérez-Monserrat.

A partir de la apertura del ramal del tren de Arganda hasta Colmenar, en 1903, la caliza de Colmenar (Fort et al., 2014) sería utilizada no sólo en elementos decorativos sino también en estructurales. La casa Pérez Villamil (1907) o la casa donde ha vivido la familia Dominguín (calle del Príncipe 55) y la reconstrucción de la Iglesia de San Sebastián son algunos ejemplos de su uso estructural en el Barrio de las Letras.

La piedra de Redueña, clasificada geológicamente como dolomicrita, tiene normalmente tonos crema y sus canteras estaban muy repartidas, cabe destacar las localidades de Redueña, Guadalix de la Sierra, el Molar, Venturada o Torrelaguna, así como otros pueblos de Guadalajara. Su denominación genérica es de piedra de Tamajón.

(<http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/geomonumentales/>)

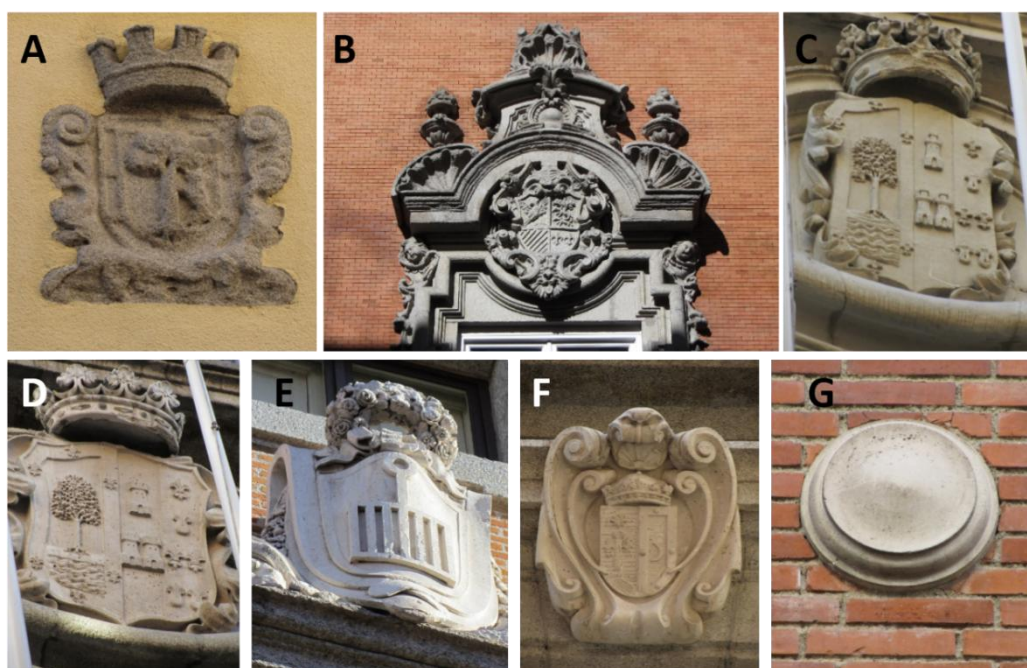


Figura 5. Detalles escultóricos.

A: Escudo de Madrid tallado en piedra berroqueña.

B: Ornamentación y escudo tallada en piedra berroqueña. Calle Carrera de San Jerónimo, 15.

C: Escudo tallado en piedra de Redueña. Palacio duque de Ugena, calle Huertas, 13.

D: Escudo tallado en caliza de Colmenar. Palacio duque de Ugena, calle príncipe, 28.

E: Escudo tallado en caliza de Colmenar. Real academia de la Historia, calle León.

F: Calle de Amor de Dios, 2. Escudo tallado en caliza de Colmenar.

G: Calle Costanilla de los desamparados, 21. Detalle botón tallado en caliza de Colmenar.

En el Barrio de las Letras se puede ver un buen ejemplo de utilización de la piedra de Redueña junto con la piedra berroqueña. El Palacio del Duque de Ugena (calle del Príncipe, 28, c/v calle de las Huertas, 13), construido por el arquitecto Pedro de Ribera entre 1730 y 1734, conserva una portada de la escuela de Ribera esculpida en piedra berroqueña. En 1876 se realizó una réplica en piedra de Redueña en la fachada de la calle de las Huertas del mismo palacio (Figura 6). La Fuente de Apolo (1803) del Paseo del Prado y la Fuente de La Fama (1731), originariamente en la Plaza de Antón Martín (actualmente en los Jardines del pintor Ribera, en la calle de Fuencarral) (Figura 7), son ejemplos de estatuas en las que se ha utilizado caliza cretácica de Redueña y la blanca de Comenar. Sin embargo, la fuente más importante del barrio de las letras es la de Neptuno (1784), que está esculpida en mármol de Monteclaros (Toledo). Originariamente Neptuno miraba hacia Cibeles y en 1897 se movió a su emplazamiento actual (Montoliú, 2002). (Figura 8)



Figura 6. Ejemplos de piedras de construcción en puertas del barrio de las letras.

A: Calle Costanilla de las Trinitarias nº 1. Convento de las trinitarias (siglo XVII), zócalo de sílex, sillares del marco de la puerta de piedra berroqueña.

B: Calle Atocha nº 87, esquina a la Costanilla de los Desamparados. Iglesia del Santísimo Cristo de la Fe (1592 y 1620) (antiguo Hospital de los Incurables de Nuestra Señora del Carmen). Zócalo, dintel y jambas de piedra berroqueña.

C: Plaza de las Cortes, Palacio de Villahermosa, portada de 1783. Zócalo, columnas, dintel jambas y piedras esquineras de piedra berroqueña.

D: Calle León, 21. Casa del Nuevo Rezado (1788) (Real Academia de la Historia), Zócalo, dintel y jambas de piedra berroqueña. Escudo de Piedra blanca de Colmenar.

E: Zócalo y elementos de la puerta de piedra berroqueña.

F: Calle Príncipe, 28. Palacio de Duques de Ugena (1734). Portada y zócalo de piedra berroqueña.

G: Calle Huertas, 13. Palacio de Duques de Ugena (1876). Portada de piedra de Redueña, zócalo de piedra berroqueña.
H: Calle de Amor de Dios, 2. Zócalo, dintel y jambas piedra berroqueña, escudo caliza de Colmenar.
I: Calle de Amor de Dios, 6. Zócalo piedra berroqueña, dintel y jambas piedra foránea.
J: Zócalo, dintel y jambas piedra berroqueña.
K: n° 89, Zócalo, dintel y jambas caliza de Colmenar.
L: Plaza Canalejas 3 y Calle Príncipe, 1. Casa de Tomás Allende, 1920. Proyectada por Leonardo Rucabado, es rica en elementos decorativos. Columnas y zócalo piedra berroqueña y presenta un remate cerámico obra de Daniel Zuloaga.
M: Calle de Amor de Dios, 1. Zócalo, dintel y jambas piedra berroqueña.
N: Calle Príncipe, 12. Revestimiento marco puerta y detalles caliza.
O: Paseo del Prado, 30. Granito y detalles de caliza.
P: Calle Costanilla de los desamparados n° 21 zócalo de piedra berroqueña y revestimiento marco puerta caliza Colmenar.
Q: Calle Príncipe, 35. Zócalo y sillares de columnas y puerta de caliza de Colmenar.
R: Calle príncipe, 21. Zócalo, dintel y jambas mármol foráneo.
S: Calle Núñez de Arce, 16. 1906. Zócalo de caliza de Colmenar de Oreja.
T: Calle Echegaray, 20. Zócalo, jambas y dintel piedra berroqueña.
U: Calle Gobernador, 13. Zócalo piedra berroqueña.
V: Calle Gobernador, 11. Zócalo piedra berroqueña.
W: Calle Costanilla de los Desamparados, 13. Zócalo, dintel y jambas piedra berroqueña
X: Zócalo piedra berroqueña.
Y: Zócalo piedra berroqueña, dintel y jambas caliza de colmenar

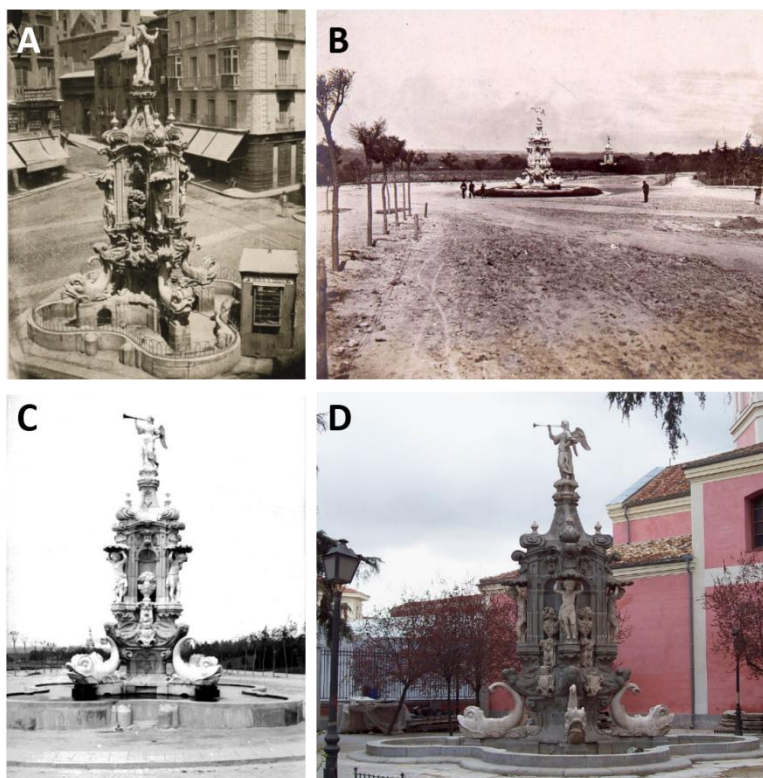


Figura 7. Fuente de la Fama (1732). A: ubicación original en la Plaza de Antón Martín, en donde ha estado hasta 1879. En 1880 se llevó al Barrio de Peñuelas y en 1913 al Parque del Oeste (B y C). D: ubicación actual desde 1941, en la calle Fuencarral.

En 1858 se abrió la línea de ferrocarril que unía las ciudades de Madrid, Zaragoza y Alicante, lo que favoreció el comercio de la piedra de Novelda (Alicante), clasificada en términos geológicos como biocalcarenita. En el

interior de la Catedral de la Almudena de Madrid se ha utilizado esta piedra (Fort et al., 2002), y en el Barrio de las Letras se puede encontrar en la Iglesia de San Ignacio de Loyola (última reconstrucción de 1942).

El desarrollo de la red ferroviaria, la bonanza económica de principios del siglo XX y los cambios en las ordenanzas municipales provocaron que se construyera con piedras de localidades distantes, hasta entonces no utilizadas o reservadas para el ornato de palacios. La plaza Canalejas y calles aledañas cuentan con el mayor número de piedras de construcción del Barrio de las Letras, en donde podemos observar gran variedad de colores y tipos. (Figura 9)

El material utilizado tradicionalmente para techar ha sido la teja árabe, sin embargo la pizarra se utilizó a partir de la segunda mitad del siglo XVI, cuando Felipe II quiso imitar los tejados de Europa Central y Septentrional en las Casas Reales y palacios de Valsaín, Pardo, Alcázar de Madrid y el Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Cano de Gardoqui García, 1991).



Figura 8.

A: Paseo del Prado a la altura del palacio de Villahermosa. Al fondo se pudo observar el Palacio de los duques de medinacelli. Actual hotel Palace.

B: Plaza Cánovas del Castillo en 1870.

C: Construcción del hotel Palace (1911-1912).

A': Platería Martínez

B': Plaza Platería Martínez en 1938.. La fuente actual es de 1999 y se realizó en honor de la platería Martínez.

C': Plaza de Platería Martínez, con estatua Vázquez de Mella en 1953.



Figura 9. Ejemplos de piedras foráneas.

A: Calle Príncipe, 18, 1918. Mármoles foráneos.

B: Calle Núñez de Arce, 1, Mármoles foráneos

C: Detalle de capitel en columna de la Iglesia de San Ignacio de Loyola. Reconstruida en 1942, piedra de Novelda (Alicante). Calle Príncipe, 8.

D: Detalle de capitel en columna de casa en la calle Príncipe, 8. mármol.



Figura 10. Mobiliario urbano y registros históricos realizados con piedra de Madrid.

A: Fuente en la plaza de Platería Martínez, piedra berroqueña y caliza de Colmenar.

B: Fuente en dependencias de la dirección de agua del ayuntamiento de Madrid, calle Costanilla de los desamparados, 15. Piedra berroqueña y caliza de Colmenar.

C: Fuente en la Plaza de Jesús, piedra berroqueña y caliza de Colmenar.

D y E: registros de alcantarilla tallados en piedra berroqueña. En la tapa de la imagen E se observa un gabarro.

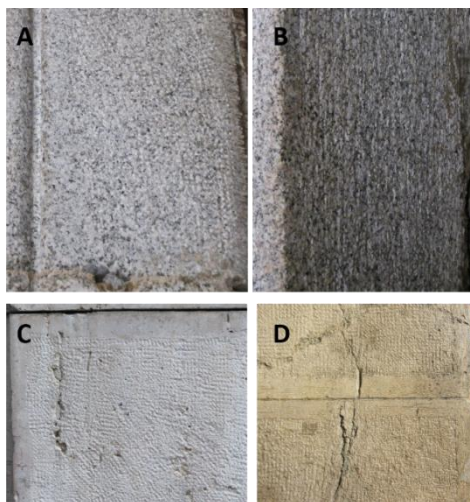


Figura 11 Acabados en piedra tradicional madrileña.

A: piedra berroqueña abujardada (11x11 picos).

B: piedra berroqueña tallada con trinchante.

C: Caliza de Colmenar. Casa Villamil, 1907, plaza de Matute.

D (n° 89 es la K): Caliza de colmenar con bordillos o encintados en el borde. Es decir, los lados visibles del sillar (tacaduras o tiradas) más lisos y las caras con acabado a puntero o picón.

Este monarca contrató en 1559 a expertos flamencos y franceses para explorar canteras de pizarra cercanas al palacio de Valsaín, ya que las de Yébenes (Toledo) no eran suficientes para la gran obra que sería el Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, techado con las pizarras provenientes de las entonces recién descubiertas canteras de Cebreros (Ávila), la Palomera, cerca de El Escorial y la de Torrelaguna (Madrid) aunque fueron las pizarras de Bernardos (Segovia) (Cano de Gardoqui, 1991) las más utilizadas en la magnífica obra. Desde entonces, la arquitectura de la corte incorporó los tejados de pizarra a dos vertientes con gran inclinación, con lucernas y torres rematadas por chapiteles (Merlos Romero 2005-2006). En el Barrio de las letras, los tejados son mayoritariamente de teja árabe, aunque la embajada de México, en la calle Carrera de San Jerónimo, número 46, rememora los típicos tejados de pizarra.



Figura 12

A: Detalle de la portada de la calle Príncipe del Palacio del Duque de Ugena. Piedra berroqueña, 1730 - 1734.

B: Detalle de la Casa Pérez Villamil, en la plaza de Matute. Caliza de Colmenar, 1907.

C: Detalle de la portada de granito de la casa de Allende o de Tomás Allende, 1920. Plaza Canalejas 3.

7.3 Urbanismo del Barrio de las Letras

El arrabal de Santa Cruz terminó convirtiéndose en una zona urbana en donde vivía la mayor parte de los médicos, actores y escritores debido al gran número de hospitales de congregaciones religiosas y corrales de comedia (Davis y Varey, 1997).

El Hospital Real de la Corte se fundó en 1483, en el solar que luego ocuparía la iglesia del Buen Suceso, cerca de la Puerta del Sol y el Hospital de San Pedro de los Italianos en la calle carrera de San Jerónimo con Cedaceros fue fundado en 1583, ambos en las proximidades del Barrio de las Letras.

El Hospital de San Juan de Dios o de Antón Martín (su fundador) se construyó en 1552 en calle de Atocha, contaba con una iglesia, utilizada por los miembros de la Orden y dejó de existir en 1858 y en su solar se construyó la Parroquia de San Salvador y San Nicolás, que fue remodelada en 1948 con caliza blanca de Colmenar y piedra berroqueña.

Felipe II decidió agrupar las instituciones sanitarias de Madrid en un Hospital General, fundado en el año 1587 al final de la calle carrera de San Jerónimo en el área que ocupa en la actualidad la Plaza de las Cortes y el edificio de las Cortes. Este hospital se reformó en 1596 y pasó a ser el Hospital de la Anunciación de Nuestra Señora.

Los festejos realizados para la entrada de Ana de Austria en 1570 motivaron las primeras reformas en lo que hoy es el paseo del Prado. Se instalaron fuentes de piedra berroqueña entre la calle Alcalá y calle carrera de San Jerónimo. Para la entrada de Margarita de Austria, en 1599 se construyó la primitiva puerta de Alcalá con piedra berroqueña, tenía un arco central mayor y dos laterales más pequeños. La adornaban las estatuas del príncipe Ocho Vianor de su madre Mantua. En sus dos extremos se elevaban dos torrecillas (Martínez Kleiser, 1926). Con esta obra se iniciaron las reformas para dar un semblante de paseo a la zona. En 1603 el duque de Lerma construyó un palacio frente al monasterio de los Jerónimos, lo que supondría una revitalización del área y de este modo, en 1610 se traslada el monasterio de Santa Isabel y las monjas trinitarias se instalan en unas casas de su propiedad en ubicación actual, entonces calle Cantarranas en 1612. En 1613 se renueva la calle de San Jerónimo y demarca la de Atocha y Felipe IV ordena en 1625 realizar una cerca con ladrillo, argamasa, piedra berroqueña y sílex que demarca el Barrio de las Letras como el límite de la ciudad.

En 1631 se ensancha la calle carrera de San Jerónimo para circular cuatro coches y vuelve a aderezarse el camino de Atocha. En 1731 Felipe V encarga la Fuente de la Fama, que combina la piedra berroqueña y piedra de Redueña en los grupos escultóricos para embellecer la Plaza de Antón Martín y mejorar el suministro de agua. La zona del Barrio de las Letras experimentó un auge urbanístico debido al incendio del Alcázar en 1734, que motivó el desplazamiento de la Corte hacia el Real Sitio del Buen Retiro.

En 1748 se sustituye la antigua Puerta de Vallecas por otra con el nombre de Puerta de Atocha reformada entre 1828 y 1829. construida de ladrillo (Monlau, 1850) (Figura 9). También en 1748 Fernando VI mandó construir el Hospital General de Atocha de Madrid (hoy museo reina Sofía y conservatorio) cuyo edificio, diseñado por José de Hermosilla emplea como material de construcción la piedra berroqueña. En 1764 se derribó la antigua puerta de Alcalá para construir la actual, conmemorativa de la llegada de Carlos III. Este monarca, de gusto neoclásico, combinó piedras de construcción de distintos colores en las obras costeadas por la corte, la piedra berroqueña de color cárdeno (Ponz, A., 1781), caliza blanca de Colmenar. Embelleció el paseo del Prado con la

instalación de fuentes en las que se utilizó estos materiales y en la reconstrucción del hospital de San Carlos, piedra berroqueña. Carlos III, encargó a Juan de Villanueva la construcción del Real Gabinete de Historia Natural (hoy museo del Prado) en piedra Berroqueña, fundado en 1772 la entrada principal de esta fachada un majestuoso cuerpo arquitectónico, compuesto de 6 grandes columnas de 12 metros de alto, con sus correspondientes pilastras de piedra berroqueña de Colmenar Viejo (Monlau, 1850). Antes de la construcción del Real Gabinete de Historia Natural, entre 1752 y 1766 su sede se encontraba en un edificio de la calle Magdalena, esquina con Lavapiés (Calatayud, 1988; Villena, 2009). De 1767 a 1808 el Real Gabinete se instaló en el Palacio del Conde de Saceda o Palacio de Goyeneche, en el número 13 de la calle de Alcalá de Madrid, actual Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. (Hernández-Pacheco, 1944).

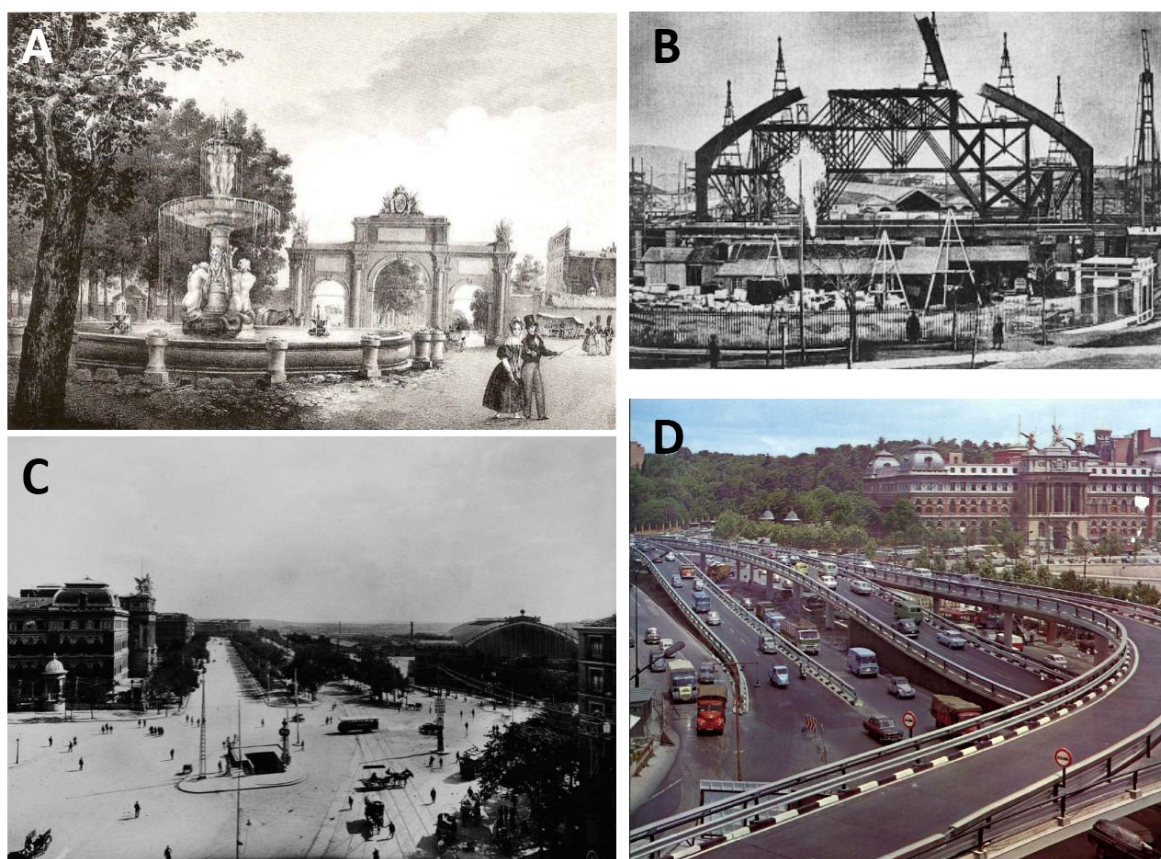


Figura 13. Actual Plaza del emperador Carlos V. A: Puerta de Atocha y fuente de la Alcachofa. B: Construcción de la estación de Atocha en 1891. C: Plaza del Emperador Carlos V en 1928. D: Plaza del Emperador Carlos V en 1964.

La platería Martínez fue construida en estilo neoclásico con piedra Berroqueña en 1792. Hoy en día se puede observar la silueta de su fachada de columnas en la plaza del mismo nombre, marcada en la acera delante del Hotel Saboy.

Las casas se construían siguiendo las ordenanzas con zócalo de piedra berroqueña, fachada de ladrillo, aleros de madera y revoco a la cal, balcones y en las cubiertas ventanas abuhardilladas. Un paseo por el barrio de las letras nos permitirá observar cómo la sostenibilidad en la construcción tradicional de Madrid era clave. Los sillares de granito que forman los zócalos están dispuestos generalmente en aparejo a sogas. Si bien debajo de las ventanas suele haber un sillar de escaso grosor que permite su fácil extracción en caso de necesidad de abrir una puerta en el vano (Figura 10). A partir de la Ley de Regalía de Aposento de Felipe II, por la cual las casas de más de una planta debían ceder una habitación a la Corte para alojar a los funcionarios del Rey, se comienzan a construir las “casas de malicia” que ocultaban desde el exterior la existencia de más de un piso. Techados muy inclinados que dieran lugar a buhardillas, plantas intermedias, ventanas desordenadas a diferentes alturas, eran algunos trucos. En cambio, la construcción de palacios no tenía estos inconvenientes y contaban con mayor cantidad de sillares de piedra berroqueña y para los elementos ornamentales se solía utilizar la caliza de Colmenar, cuyo uso se incrementó en el siglo XVIII.



Figura14. Sillares históricos de piedra berroqueña en el zócalo y bajo ventanas.

A: Sillar original en zócalo de piedra berroqueña bajo ventana. Estos sillares tienen una menor profundidad para facilitar su extracción y abrir una puerta.

B: se muestra el menor espesor de los sillares de piedra berroqueña en zócalos bajo ventanas.

C: Zócalos que han perdido los sillares debajo de las ventanas por apertura de puertas en el pasado.

Durante el reinado de José I se derribaron muchas iglesias y casas para crear plazas que descongestionasen el actual Barrio de las Letras. Así surgió la plaza de Santa Ana (1812) (Lopezosa Aparicio, 2010) permitiendo el tránsito hacia la calle del Prado y Huertas, principales vías de acceso hacia el Paseo del Prado (Figura 11). El principal material pétreo utilizado en el adoquinado y edificios fue la piedra berroqueña.

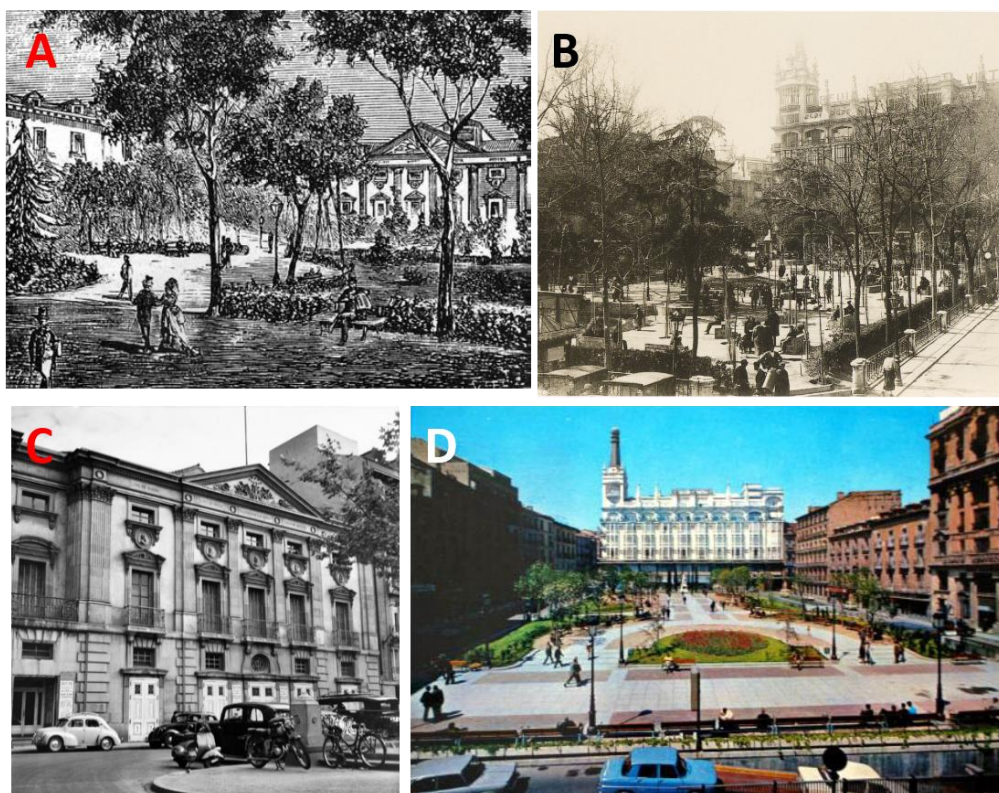


Figura 15. Plaza de Santa Ana

A: con el trazado de los nuevos jardinillos (Á. Fernández de los Ríos, Guía de Madrid, 1876). B: en 1920. C: en 1960. D: hacia 1968.

De igual modo, en 1818 se derribó del convento de Santa Catalina para urbanizar la plaza de las Cortes, en donde la piedra berroqueña tiene especial protagonismo en sus edificios. En el lugar que ocupaba el hospital de la Pasión fue construido, entre 1831 y 1840, uno nuevo que pasó a ser la sede del Real Colegio de Medicina y Cirugía de San Carlos y en la actualidad el ilustre Colegio Oficial de Médicos de Madrid y el Instituto Nacional de Administración Pública. Aquí la piedra berroqueña es utilizada en zócalos, jambas y dinteles de ventanas. Por otra parte, la Puerta de Atocha de ladrillo se derribó en 1850 y fue sustituida por otra nueva en 1852 en piedra berroqueña y caliza de Colmenar. Desapareció en 1868 con el derribo de la vieja cerca de Felipe IV quedando así configurada la actual trama urbanística del barrio. En el lugar que ocupaba la Puerta de Atocha se inauguró la actual estación de Atocha en 1892. Su zócalo es de sillares de piedra berroqueña.

Las sucesivas cercas que ha tenido Madrid (las primeras defensivas y las de Felipe II y IV fiscales y sanitarias) han actuado como canteras, aportado material de construcción a medida que iban perdiendo su función.

7.4 Pavimentación en el Barrio de las Letras

Los caminos de tierra de lo que hoy es el Barrio de las Letras se empiezan a empedrar con morrillo, guijo o cantos rodados de cuarcita, conocidos con el nombre de lágrimas de Moisés o de San Pedro. También recibían otros nombres como “garbancillo”, los de menor tamaño (2 -3 cm de diámetro), “almendreta” con tamaño mediano y "cabeza de perro", el más utilizado, con tamaño de unos 12 cm de diámetro. El material eran cantos rodados provenientes de ríos y arroyos (Martín, 1994).

El empedrado conocido como “de cuña” se componía por piedras de sílex de formaciones terciarias, llamado también "diamantes de San Isidro” (Figura 12), pues su interior era translúcido o acaramelado y se extraía de las cercanías de la ermita de San Isidro, en las terrazas del río Manzanares cercanas a la Casa de Campo, Vicálvaro, Vallecas y Coslada. Su diámetro era mayor, entre 15 y 20 cm. (Llugardo, 1776; Martín, 1994).

Los vecinos debían almacenar (bajo pena de multa) material de reposición en los corrales o patios de sus casas para arreglar los desperfectos en la pavimentación.

Para el ensanche y posterior empedrado de la calle de Alcalá en 1599 se extrajo tierra de los huertos de Urbina y Sardeneta (cercanas al monasterio de Recoletos) vertiéndola en las calles del Prado y entre la Puerta de Alcalá y la calle de San Jerónimo (Lopezosa Aparicio, 1999).

Un auto del Consejo de Su Majestad de 1612 obligaba a los dueños de las casas a pagar las losas de las aceras del frente de sus casas, mientras que las aceras entre solares, serían realizadas por la Villa. No fue hasta 1660 que el convento de Atocha hizo empedrar el camino antiguo. El empedrado era deficiente, produciendo accidentes de coches de mulas y peatones. Esta situación empeoró durante la Guerra de Sucesión, como figura en un informe posterior a ella, de 1730 (Anexo)

En 1745 el corregidor conde de Maceda dictó las ordenanzas u obligaciones de empedrado de Madrid y sus arrabales y en 1747 se publicó la instrucción de que los empedrados fuesen de morrillo "cabeza de perro", arena y tierra de tapiadores que se transportaban en cabalgaduras con serones.

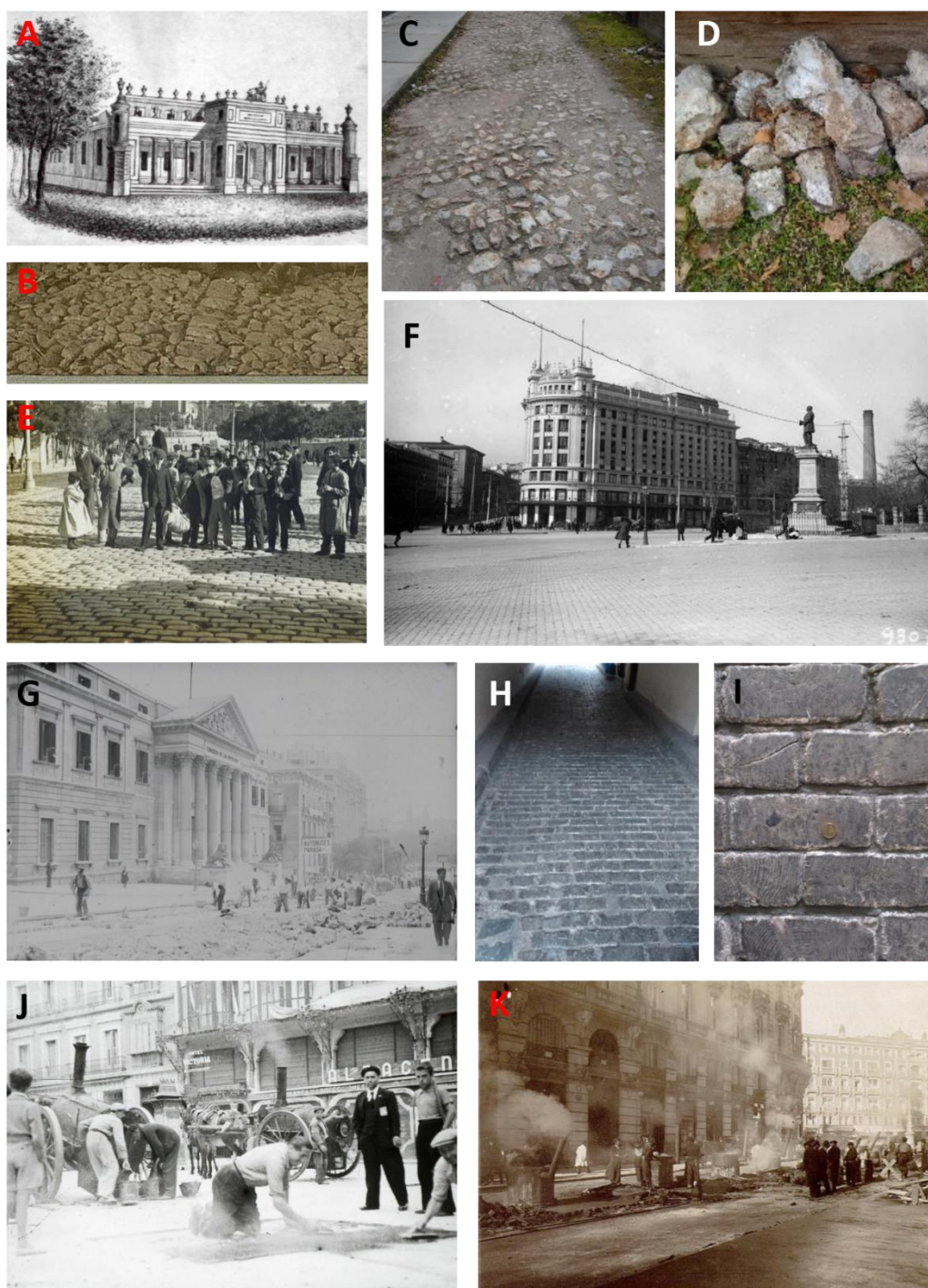


Figura 16 A: Pavimentación con morrillo, fábrica de la Platería de Martínez, actual hotel Saboy.

B: Pavimentación con morrillo cabeza de perro.

C: “Cuñas”, Sílex acumulado en una corrala madrileña.

D: Depósito de cuñas en corrala

E: Adoquines de piedra berroqueña en calle Carrera de San Jerónimo. 1900.

F: Plaza Emperador Carlos V, 1929.

G: Pavimentación con adoquines de piedra berroqueña. calle Carrera de San Jerónimo.

H: Pavimentación con tarugos de madera

I: Tarugos de madera

J: Asfaltado plaza de Santa Ana. Hacia 1905.

K: Asfaltado calle Sevilla. 1905.

Las piedras se colocaban muy apretadas unas con otras, hincando sus puntas, maceando las piedras y echando tierra entre sus límites, los hoyos se macizaban a pisón (De Castro Guerrero, 1899).

En 1761, durante el reinado de Carlos III, se aprobó la *"Instrucción para el nuevo empedrado y limpieza de las calles de Madrid, en que se contiene substancialmente el Proyecto de Don Francisco Sabatini"* (Anexo) y la ordenanza de Teodoro Ardemans. En esta instrucción se proyectó pavimentar de forma experimental la calle carrera de San Jerónimo, dividiéndola en dos partes: desde la iglesia de los Italianos hasta las Quatro Calles, y desde allí a la iglesia del Buen-Sucesso, una mitad se pavimentaría con losas de piedra berroqueña y la otra mitad con cantos rodados para comprobar la durabilidad de coste de los distintos materiales de construcción. Lo que representó los primeros ensayos de durabilidad del material de construcción en España. El rey costearía este empedrado y los gastos anuales de limpieza para dar ejemplo del deber de cada propietario de pavimentar el frente de sus casas.

Nada más recibir la ordenanza, el duque de Medinaceli se comprometió con el rey en empedrar todo el frente de su palacio, siendo posiblemente el primer edificio del Barrio que secundó la orden.

Durante el mandato del corregidor Joaquín Vizcaíno (1834-1836), marqués viudo de Pontejos, las aceras de losas de piedra berroqueña empezaron a tener altura respecto a la calzada, aproximadamente 14 cm., eran más anchas y espaciosas, lisas y con bordillos o encintados en el borde. El granito debía ser de grano fino y compacto; y las losas debían tener unas dimensiones mínimas de 1 m. de largo, 84 cm. de ancho y un grueso constante de 13 cm. en toda su extensión; se especificaba incluso cómo debía de efectuarse la labra de las losas: con los lados (tacaduras o tiradas) más lisos y el resto de la losa con cavado a puntero o picón. El asentado de las losas de las aceras se haría extendiendo mortero y el grosor de las juntas entre las losas debía ser menor de cinco milímetros.

En 1845 se reparó el Paseo del Prado con morrillo y arena desde la fuente de Neptuno a la Puerta de Atocha y las aceras de la calle Santa Isabel (Comella, 2010) se construyeron en 1870.

En 1878 se ensayó el entarugado (adoquines de madera) de las calles del León y Príncipe con madera de pino del país. Esta pavimentación consistía en una base de hormigón hidráulico con cemento Portland, sobre la que

se extendía una capa de mortero del mismo cemento, poniendo encima de ella los tarugos alquitranados de unas dimensiones aproximadas de 22 cm. de largo, 8 cm. de ancho y 15 cm. de altura. Se colocaban por hiladas separadas unos 8-10 cm. Este espacio se rellenaba con alquitrán por abajo y en la parte superior con mortero de cemento. Para permitir la dilatación de la madera se dejaba a lo largo de los encintados un hueco de 3 o 4 cm. (De Castro Guerrero, 1899). El resultado de estos tarugos no resultó muy exitoso. En 1899 ya no se utilizaba y se quitaron de las calles del Arenal, Príncipe, Carlos III, Plaza de Isabel II y calle carrera de San Jerónimo, aunque aún se conservaban en las de Sevilla, Peligros y Barquillo.

A partir de 1899 se dejó de utilizar el empedrado con morrillo y comenzó a generalizarse el uso de adoquines de piedra berroqueña. También comenzaron a surgir otros materiales como el asfalto, y en 1903 se asfaltó parte de la calle Alcalá.

El alcalde Eduardo Dato hizo unas importantes obras de pavimentación por toda la ciudad en 1907. En lo que respecta al Barrio de las Letras, se adoquinó la calle León y sus aceras, calle Atocha, calle carrera de San Jerónimo, glorieta de Atocha (con cuña), Huertas y parte del paseo del Prado, pues desde la Puerta de Atocha hasta la plaza de Cánovas se asfaltó. Se construyeron las aceras de la calle Amor de Dios y en 1909 se asfaltó esta calle. En 1913 se empedró con adoquines la calle Alcalá y con cuñas la calle carrera de San Jerónimo.

A principios del siglo XX los políticos madrileños reciben fuertes críticas debido al mal estado del pavimento de Madrid, que no cesarán hasta la Guerra Civil. En 1916 se encargó a la "Sociedad de Pavimentación y Construcciones Civiles" la pavimentación de Madrid. Esta sociedad explotó canteras de piedra berroqueña en Zarzalejo.

En 1917 el diario ABC publicó sátiras sobre el deficiente estado de la calle carrera de San Jerónimo.

En 1924 se pavimentó una parte de la calle Huertas con pórfido de Colmenar Viejo. Sin embargo, el asfalto comenzó a ganar protagonismo y en 1925 el paseo del Prado ya estaba asfaltado y sobre 1927 se comenzaron a sustituir las cuñas de las calles por adoquines o asfaltado.

En 1983 se sustituyó el asfalto de la calle Huertas por adoquines y en 2004 se iniciaron los trabajos de peatonización del Barrio de las Letras, delimitado por la calle de Atocha, la Plaza de Jacinto Benavente, la calle

de la Cruz, la Plaza de Canalejas, la calle carrera de San Jerónimo, las plazas de las Cortes y de Cánovas del Castillo y el Paseo del Prado.

Los materiales utilizados en esta ocasión fueron filita negra, cuarcita roja, mármol sierra Elvira, granito gris, negro y rojo, así como prefabricados de hormigón (adoquines negro tipo casco viejo, adoquín románico color siena) que son los materiales que se pueden observar actualmente.

7.5 Inventario de la piedra de construcción

Se ha inventariado el tipo de piedra utilizado en los zócalos de 583 edificios de 35 calles y plazas del Barrio de las Letras de Madrid. El inventariado ha sido caminando, distinguiendo entre sílex, piedra berroqueña, piedra de Colmenar y piedra de Redueña y otros materiales. Es decir, entrándose en las piedras de construcción tradicional de Madrid. Como se puede observar en la tabla 1.

Calle	Perifoneos muestrados	tipo	nº	Calle	Perifoneos muestrados	tipo	nº	Calle	Perifoneos muestrados	tipo	nº		
A lameda	15	Zocalo original de P.B.	9	de la Victoria	12	Zocalo original de P.B.	9	San Agustín	17	Zocalo original de P.B.	1		
		Se conserva el original	Revelado			p.b.	2			Se conserva el original	Revelado	p.b.	2
		Revelado	p.b.			2	Revelado			p.b.	2		
		Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta						
		Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar						
		Zocalo original Siles					Zocalo original Siles						
		Otro					Otro						
		Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico			De otro material			
		De granito					De granito						
		Zocalo original de P.B.	14			del Puerc	13			Zocalo original de P.B.	10	San Blas	9
Se conserva el original	Revelado	p.b.	2	Se conserva el original	Revelado			p.b.	2				
Revelado	p.b.	2	Revelado	p.b.	2								
Zocalo original Reduñta			Zocalo original Reduñta										
Zocalo original Cominuar			Zocalo original Cominuar										
Zocalo original Siles			Zocalo original Siles										
Otro			Otro										
Zocalo rubico	De otro material		Zocalo rubico	De otro material									
De granito			De granito										
A mor de Dios	14	Zocalo original de P.B.	11	del Pozo	8			Zocalo original de P.B.	5	San Pedro	22		
		Se conserva el original	Revelado			p.b.	2	Se conserva el original	Revelado			p.b.	2
		Revelado	p.b.			2	Revelado	p.b.	2				
		Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta						
		Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar						
		Zocalo original Siles					Zocalo original Siles						
		Otro					Otro						
		Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico	De otro material					
		De granito					De granito						
		Cenicero	3			Zocalo original de P.B.	2	Duques de Medinaceli	3			Zocalo original de P.B.	1
Se conserva el original	Revelado			p.b.	2	Se conserva el original	Revelado			p.b.	2		
Revelado	p.b.			2	Revelado	p.b.	2						
Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta								
Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar								
Zocalo original Siles					Zocalo original Siles								
Otro					Otro								
Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico	De otro material							
De granito					De granito								
Cervantes	26			Zocalo original de P.B.	21	Echegaray	27			Zocalo original de P.B.	20	Santa María	23
		Se conserva el original	Revelado	p.b.	3			Se conserva el original	Revelado	p.b.	3		
		Revelado	p.b.	3	Revelado			p.b.	3				
		Zocalo original Reduñta			Zocalo original Reduñta								
		Zocalo original Cominuar			Zocalo original Cominuar								
		Zocalo original Siles			Zocalo original Siles								
		Otro			Otro								
		Zocalo rubico	De otro material		Zocalo rubico			De otro material					
		De granito			De granito								
		Costanilla de los ruidos	15	Zocalo original de P.B.	9			Espoz y Mina	21	Zocalo original de P.B.	13		
Se conserva el original	Revelado			p.b.	2	Se conserva el original	Revelado			p.b.	2		
Revelado	p.b.			2	Revelado	p.b.	2						
Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta								
Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar								
Zocalo original Siles					Zocalo original Siles								
Otro					Otro								
Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico	De otro material							
De granito					De granito								
Costanilla Trinitarias	2			Zocalo original de P.B.	1	Gobernador	27			Zocalo original de P.B.	22	Príncipe	29
		Se conserva el original	Revelado	p.b.	2			Se conserva el original	Revelado	p.b.	2		
		Revelado	p.b.	2	Revelado			p.b.	2				
		Zocalo original Reduñta			Zocalo original Reduñta								
		Zocalo original Cominuar			Zocalo original Cominuar								
		Zocalo original Siles			Zocalo original Siles								
		Otro			Otro								
		Zocalo rubico	De otro material		Zocalo rubico			De otro material					
		De granito			De granito								
		de Jesús	8	Zocalo original de P.B.	15			Huerfanas	65	Zocalo original de P.B.	5		
Se conserva el original	Revelado			p.b.	2	Se conserva el original	Revelado			p.b.	2		
Revelado	p.b.			2	Revelado	p.b.	2						
Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta								
Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar								
Zocalo original Siles					Zocalo original Siles								
Otro					Otro								
Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico	De otro material							
De granito					De granito								
de la Cruz	23			Zocalo original de P.B.	15	Infante	6			Zocalo original de P.B.	5	Plaza Ó novas del Castillo	3
		Se conserva el original	Revelado	p.b.	2			Se conserva el original	Revelado	p.b.	2		
		Revelado	p.b.	2	Revelado			p.b.	2				
		Zocalo original Reduñta			Zocalo original Reduñta								
		Zocalo original Cominuar			Zocalo original Cominuar								
		Zocalo original Siles			Zocalo original Siles								
		Otro			Otro								
		Zocalo rubico	De otro material		Zocalo rubico			De otro material					
		De granito			De granito								
		Plaza de las Cortes	11	Zocalo original de P.B.	8			león	32	Zocalo original de P.B.	22		
Se conserva el original	Revelado			p.b.	6	Se conserva el original	Revelado			p.b.	6		
Revelado	p.b.			6	Revelado	p.b.	6						
Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta								
Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar								
Zocalo original Siles					Zocalo original Siles								
Otro					Otro								
Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico	De otro material							
De granito					De granito								
de la Vega	12			Zocalo original de P.B.	13	Moratín	46			Zocalo original de P.B.	11	Plaza de Jesús	4
		Se conserva el original	Revelado	p.b.	9			Se conserva el original	Revelado	p.b.	9		
		Revelado	p.b.	9	Revelado			p.b.	9				
		Zocalo original Reduñta			Zocalo original Reduñta								
		Zocalo original Cominuar			Zocalo original Cominuar								
		Zocalo original Siles			Zocalo original Siles								
		Otro			Otro								
		Zocalo rubico	De otro material		Zocalo rubico			De otro material					
		De granito			De granito								
		de la Verónica	10	Zocalo original de P.B.	2			Núñez del Arce	15	Zocalo original de P.B.	1		
Se conserva el original	Revelado			p.b.	1	Se conserva el original	Revelado			p.b.	1		
Revelado	p.b.			1	Revelado	p.b.	1						
Zocalo original Reduñta					Zocalo original Reduñta								
Zocalo original Cominuar					Zocalo original Cominuar								
Zocalo original Siles					Zocalo original Siles								
Otro					Otro								
Zocalo rubico	De otro material				Zocalo rubico	De otro material							
De granito					De granito								

Tabla 1 en donde se muestran las calles y número de edificios estudiados con las características de sus sillares.

De los 583 edificios estudiados, 562 correspondían a edificios con más de 30 años. El 94,8 % de estos tienen zócalo construido con sillares de piedra berroqueña. La piedra de Colmenar representa un 2,7 %, la piedra de Redueña un 0,4%, el sílex un 0,2 % y otros materiales, un 2%. (Figura 17A)

Si se analiza el estado de los zócalos que han sido contruidos con piedra berroqueña, observamos que el 82,2 % de los edificios históricos conservan su zócalo original en alguna parte de su fachada. Mientras que en el 17,8 % de los edificios estudiados, el zócalo original ha sido tapado en el 100% de la fachada (figura 17 B). El material de revestimiento utilizado en este caso no corresponde con las características estéticas, petrofísicas o de durabilidad que tiene la piedra berroqueña. En este sentido (figura XXX C) se ha determinado que el 84,2 % de los revestimientos de zócalos se realizó con materiales de construcción muy distintos a la piedra berroqueña.

Los edificios cuyo zócalo o fachada existe caliza de Colmenar de Oreja están circunscritos a un periodo de tiempo muy concreto, el primer tercio del siglo XX. Se trata de edificios de mayor calidad y diseño más cuidado. Esta época corresponde con la apertura de la línea de tren de Arganda a Colmenar (1903) período histórico en el que Alfonso XIII otorga a Colmenar de Oreja de título de Ciudad. En general, los edificios en los que se ha utilizado la caliza de Colmenar conservan su piedra original sin haber sufrido remodelaciones y sus piedras de construcción están mejor conservadas.

El sílex o la piedra de Redueña tienen una presencia casi testimonial en el Barrio de las letras, si bien los edificios en los que se ha utilizado tienen gran importancia histórica y cultural.

En los edificios de nueva construcción no hay un uso sistemático de la piedra berroqueña, si no que la mayoría de los nuevos edificios esta piedra no se ha utilizado.

El estado de conservación del 82,2 % de los zócalos de piedra berroqueña que se conservan en el barrio de las letras es muy deficiente. A pesar de las excelentes propiedades petrofísicas de este material.

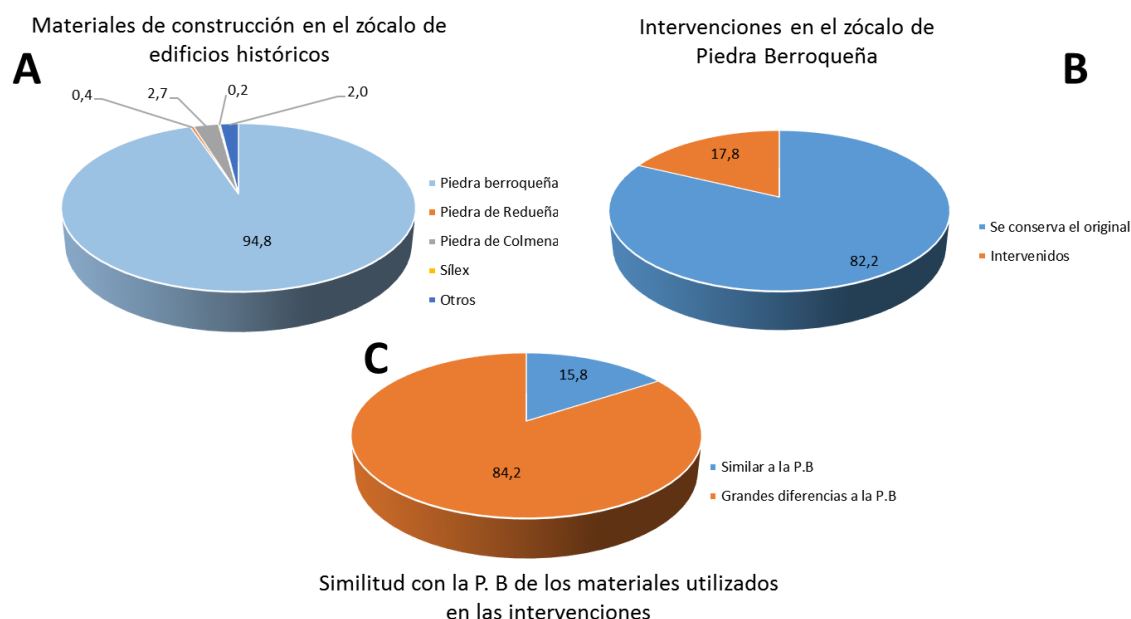


Figura 17

7.6 Deterioro de las piedras de construcción

La historia geológica y las características petrofísicas y petrológicas de las piedras de construcción, así como el clima, la contaminación y las condiciones de uso, en conjunción con otros factores, determinan su durabilidad.

Como se ha dicho anteriormente, la piedra de construcción predominante en el Barrio de las Letras es La piedra berroqueña, seguido de la caliza de Colmenar, la piedra de Redueña y finalmente otras, como la piedra de Novelda, son testimoniales. La piedra berroqueña tiene unas propiedades idóneas para combatir la humedad y ascenso capilar. Sin embargo, a pesar de su resistencia a la alteración, en el Barrio de las Letras se puede observar deterioro como de eflorescencias salinas, biodeterioro, desplazados superficiales, fracturas y sobre todo, deterioro antrópico, es decir, el causado por el ser humano. Los zócalos construídos con caliza de colmenar son lo que mejor conservados están. Pintadas, utilización indiscriminada de cemento por encima de las juntas, son algunos ejemplos. El más habitual es la presencia de numerosas perforaciones realizadas en los últimos años para sujeción de cableado o rótulos, también se observan marcas de proyectiles, manchas y grafitis.

El tipo de mantenimiento o limpieza que se debe aplicar a estas piedras centenarias vendrá condicionado por el tipo de deterioro, el grado de pulimento o acabado (microrrugosidad) y la mineralogía teniendo especial cuidado en los sillares más antiguos, que pueden estar más alterados.

Para que el Barrio de las Letras continúe gozando de la identidad que las piedras históricas con las que está construido le otorgan, el grupo de Petrología Aplicada a la Conservación del Patrimonio del Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM) ha presentado la candidatura de los granitos de Alpedrete, Cadalso de los

Vídríos y Zarzalejo, (Freire-Lista et al., 2015a, e, f) así como la de la Caliza de Colmenar de Oreja a la nominación como Global Heritage Stone Resource, (Cooper et al., 2013) como una apuesta por la conservación del centro histórico de Madrid para que todos los agentes implicados en la conservación del Barrio trabajen en el mismo sentido.

Durante la realización de este estudio se ha observado cómo día a día los sillares históricos de Madrid están sufriendo continuas agresiones antrópicas, la mayoría debidas a cambios de uso del local. Es imprescindible que se cambie la legislación con respecto a los sillares históricos, ya que de no ser así, se perderán en muy poco tiempo.

Todos los casos de sustitución o revestimiento de sillares del zócalo de edificios del Barrio de las Letras ha sido con material y forma de los sillares distinto al original, en la mayoría de los casos, el granito utilizado y dimensiones del sillar no tienen relación con el utilizado tradicionalmente en Madrid.

Este estudio se ha realizado en uno de los Barrios más turísticos de Madrid, las condiciones de los sillares históricos en otros barrios del centro corren mayor riesgo de deterioro.

La Carta de Amsterdam (1975) dice que “El Patrimonio arquitectónico Europeo no está formado solamente de los Monumentos más importantes, sino también de los conjuntos de edificios que componen nuestra ciudad y nuestros pueblos tradicionales en su ambiente natural o construido”. Cada día se producen atentados al patrimonio construido, perforaciones con taladros, revestimientos incorrectos, grafitis... están arruinando el patrimonio construido de la ciudad de Madrid.



Figura 18. Deterioro en sillares históricos barrio de las letras.

- A: Placas de revestimiento de granito Rosa Porriña, producen un deterioro estético y cultural. Este granito es de color distinto a la piedra berroqueña.
- B: Graffitis sobre de piedra berroqueña producen un deterioro estético, su limpieza produce pérdida de cristales y se pierde el acabado abujardado.
- C: Sillar histórico de piedra berroqueña con tratamiento impermeable que produce burbujas y pérdida de material en la superficie del sillar.
- D: Deterioro estético en sillar histórico de piedra berroqueña debido al derrame de líquido oleaginoso.
- E: Deterioro en sillares históricos de piedra berroqueña debido a impactos de proyectiles de la Guerra Civil Española. en la fachada del hotel Radison Blu, plaza de Platería Martínez.
- F: Roturas debidas a la perforación de agujeros en sillar de Caliza de Colmenar, amalgama de cables producen el efecto contrario que el escultor.
- G: Sillar histórico de piedra berroqueña al que se le ha eliminado su superficie con una rebarbadora
- H: Sillar histórico de piedra berroqueña al que se le ha añadido mortero.
- A': Redondeamiento de vértices de sillar histórico de piedra berroqueña (Rubia), debido posiblemente al origen de cantera más superficial, o bolo.
- B': Fracturas de descompresión concéntricas en sillar histórico de piedra berroqueña, posiblemente también debidos al origen como bolo.
- C': Fractura en sillar histórico de piedra berroqueña debida a causas estructurales.
- D': Manchas en la piedra de Redueña debidas al goteo e
- E': Desplacado en sillares de piedra berroqueña. Palacio de las Cortes. Calle Carrera de San Jerónimo.
- F': Humedades y migración de óxidos en sillares históricos de piedra berroqueña.
- G': Pérdida de material por fractura en la piedra de Redueña.



Figura 19 Iglesia de San Sebastián 1936. La construcción original fue con piedra berroqueña. En la reconstrucción se ha utilizado para el zócalo piedra berroqueña y caliza de Colmenar de Oreja en placas de revestimiento.

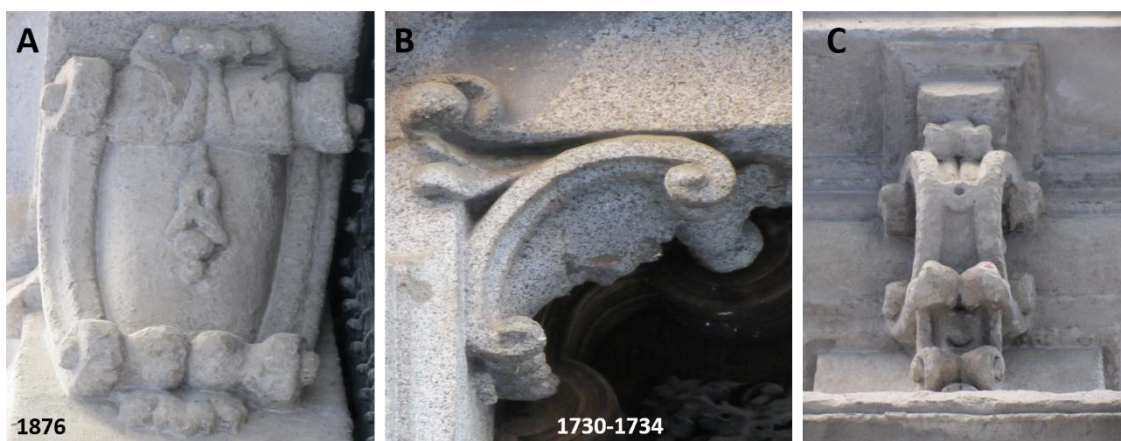


Figura 20. Deterioro en detalles de las portadas del palacio del Duque de Ugena.

A: Detalle tallado en piedra de Redueña en 1876

B: Detalle tallado en piedra berroqueña entre 1730-1734. En la parte superior se observa un gabarro.

C: Detalle tallado en piedra de Redueña en 1876

7.7. Bibliografía

Aguilar y Vela, J.M., Alaxis, V., Aranda, P., Arbós y Tremanti, F., Arévalo Calvet, C., Arimón, G., Bellido y González, L., Belmás Estrada, M., Borrás Soler, F., Bravo Sanfeliú, P., Bussato, G., Bustillo, P., Cano Lasso, J., Judas Cañizares, S., Carrasco Muñoz, J., de Castro, C.M., Caveda, M., de la Concha Alcalde, J., Corrales Gutiérrez, J.A., Domínguez Uceta, E., de la Mora, S., Fernández Alba, A., Fernández Sanahuja, M., Fernández Shaw, C., Gálvez, F. García Díaz, A., Gaviña, W., González Velázquez, I., Grases i Riera, J., Grasset, E., de las Heras, J.R., Hernández Callejo, A., Jalvo Millán, M., Jareño y Alarcón, F., Lacasa, L., Llanos, I., López Aguado, A., Ángel López Calleja, M., López Durán, A., López Sallaberry, J., Marco Puyol, T., Martínez-Zapata Rodríguez, J., Mérida y Alinari, A., Mínguez, E., Oms y Canet, M., d'Ors Pérez-Peix, V., Ortiz e Iribas, L. Oyarzábal, J., de Palacio Elissague, A., Palacios Ramilo, A. Palancares, A., Pascual y Colomer, N., Pérez Villamil, J., Rodrigáñez y Vallejo, C., Rubio Marín, A., Sánchez Pescador, F., Sánchez Pescador, J.J., Tejeda Díez, B., de la Torre, J., Zalva, P. Dibujos de arquitectura madrileña de los siglos XIX y XX. 216 p http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/MuseosMunicipales/MuseoDeHistoriaDeMadrid/EspecialInformativo/05_Publicaciones/ArquitecturaMadrile%C3%B1a/Cat.DibujosSiglosXIXyXX.pdf

Aranguren, J. y López Bustos, C. 1990. El ferrocarril de Villalba a El Berrocal: Carril, 29:43-51.

Bernabéu, A., Benavente, D., Fort, R., García del Cura, M.A., Martínez-Martínez, J., y Menduiña, J., 2004, Valoración petrofísica del granito de Zarzalejo (Sistema Central) para su utilización como piedra de pavimento en cascos históricos. 6º Reunión Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural. CSIC. Seville, Centro Nacional de Aceleradores.

Bustillo, M.A. y Alonso-Zarza, A.M. 2009. Transformaciones edáficas y diagenéticas de los depósitos aluviales distales del Mioceno de la Cuenca de Madrid, área de Paracuellos de Jarama. Estudios Geol., 59: 39-52.

Cabello y Lapiedra, 1901. Madrid y sus arquitectos en el siglo XIX. Resumen de Arquitectura, v. 3, p. 35.

Cano de Gardoqui García, J.L., 1991. Antecedentes de la arquitectura Barroca española: Las cubiertas de pizarra en las obras reales de Felipe II y su tránsito al siglo XVII.

Calatayud, M.A., 1988. Pedro Franco Dávila y el Real Gabinete de Historia Natural. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Cavanilles, A. Memoria sobre el fuero de Madrid, del año de 1202. Es separata de Memorias de la Real Academia de la Historia. Tomo VIII (s.a.). 73 p.

Comella, B., 2010. José María Escrivá de Balaguer en el Real Patronato de Santa Isabel de Madrid (1931-1945) Instituto Histórico Escrivá de Balaguer.

Cooper, B.J., Marker B.R. y Thomas I.A., 2013. Towards International Designation of a Heritage Dimension Stone: Key Engineering Materials, 548:329-335.

Davis, C y Varey, J.E., 1997. Los corrales de comedias y los hospitales de Madrid, 1574-1615: estudio y documentos. Fuentes para la historia del teatro en España XX. Ed Támesis S.L. Madrid. ISBN: 84-88546-16-5.

De Castro Guerrero, M., 1899. Los pavimentos de Madrid. Revista de Obras Públicas. Año 66. 1256:413-415.

Fernández de los Ríos, Á., 1876. Guía de Madrid. Manual del madrileño y forastero, Madrid, Oficinas de la Ilustración Española y Americana.

Fort, R., Bernabéu, A., García del Cura, M.A., Ordoñez, S., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F., 2002, Novelda Stone: a stone widely used within the Spanish architectural Heritage: *Materiales de Construcción*, v. 52, 266, p. 19-32.

Fort, R., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M., y Freire-Lista, D.M., 2011, Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone: *Journal of Geophysics y Engineering*, 8:132-144.

Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E.M., Gómez-Heras, M., Varas-Muriel, M.J. y Freire-Lista, D.M., 2013, Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain: *Quarterly Journal of Engineering Geology y Hydrogeology*, 46:421-429.

Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., 2014. Colmenar Limestone, Madrid, Spain: considerations for its nomination as a Global Heritage Stone Resource due to its long term durability. *Geological Society, London, Special Publications*, 407:121-135. doi:10.1144/SP407.8

Gómez-Heras, M., Smith, B.J., y Fort, R., 2008, Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response y its potential for the generation of thermoclasty: *Environmental Geology*, 56:547-560, <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-008-1356-3>.

Hernández-Pacheco, E., 1944. El Museo de Ciencias Naturales y sus naturalistas en los siglos XVIII y XIX. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto José de Acosta (publicaciones del Museo Nacional de Ciencias Naturales).

Lopezosa Aparicio, C., 1999. Origen y desarrollo de un eje periférico de la capital, paseo del Prado Viejo de San Jerónimo y Paseo de Atocha. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Lopezosa Aparicio, C., 2010, Sobre los planes de intervención de José I en Madrid. *Cuadernos de Historia Moderna*, 9:47-61.

Llorente Pinto, J.M., 2011. El valor indicador de los topónimos. El caso de la voz berrocal y sus variantes: *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56:50-77.

Llugardo, B., 1776. Piedras de San Isidro, su naturaleza, valor y ventajas. 47 pp

Marcos y Bausa, R., 1879. Manual del albañil Published by Tipografia editorial de G. Estrada., ISBN 10: 8497610571 / ISBN 13: 9788497610575

Margarot, M., 1780. Histoire ou relation d'un voyage qui a duré près de cinq ans; pendant lequel l'auteur a parcouru une partie de l'Angleterre, la France, l'Espagne, ... Par Mr. Maurice Margarot, le père.

Martín Moreno, S., 1994. Tesis doctoral, Materiales Pétreos Tradicionales de Construcción en Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 772 p.

Martínez Kleiser, L., 1926. Guía de Madrid para el año 1656 publicada 270 años más tarde. Imprenta municipal, 1926. 112 pp

Monlau, Pedro Felipe. 1850. Madrid en la mano ó el amigo del forastero en Madrid y sus cercanías.

Montoliú, P, 2002. Madrid, villa y corte: calles y plazas, Volumen 2, 339 pp

Pérez-Monserrat, E.M., Alvarez de Buergo, M., Gómez-Heras, M., Varas Muriel, M.J., y Fort, R., 2013, An urban geomonumental route focusing on the petrological y decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain: Environmental Earth Sciences, 69:1071-1084.

Ponz, A. 1781, Viaje de España, tomo X carta III pg 57

Shadmon, A., 1989, Stone, an introduction. Intermediate Technology Publications. 140 pp

Tárraga Baldó, M.L., 2009. Mármoles y rocas ornamentales en la decoración del Palacio Real de Madrid Archivo Español de Arte, 82(328):367-392.

Villena, M., Almazán, J. S., Muñoz, J. y Yagüe, F., 2009. El gabinete perdido. Pedro Franco Dávila y la Historia Natural del Siglo de las Luces. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

8- CONCLUSIONES

Cada uno de los artículos presentados anteriormente muestra sus propias discusiones y conclusiones. En este apartado se hace una recopilación de las conclusiones más importantes obtenidas en la tesis.

La Sierra de Guadarrama ha suministrado distintas variedades de granito conocidas como piedra berroqueña a la construcción en la región de Madrid desde la antigüedad (Fort et al, 2013). Actualmente, su producción no solo se comercializa a nivel local y nacional, sino que se exporta a distintas partes del mundo (Freire y Fort, 2015a, b, Freire-Lista et al, 2015d, e). Por ello, los primeros cinco artículos recogen la caracterización de los cuatro granitos más representativos de la Sierra de Guadarrama (Fort et al., 2011; Freire-Lista et al., 2015b, c, g) a través de la valoración de sus propiedades petrofísicas, permitiendo así determinar su grado de calidad y durabilidad, y sus formas de deterioro más representativas debidas a condiciones ambientales inducidas aunque muy habituales en la climatología mundial actual. Con la identificación de los grados de anisotropía natural para los cuatro granitos considerados y sus formas de deterioro asociadas (microfisuración inter-, intra- y transcristalinas), los dos artículos siguientes (Freire-Lista y Fort, 2015d, 2016) hacen hincapié en cómo los canteros sin saberlo han utilizado desde antiguo esta anisotropía natural y que les ha facilitado la extracción, labra y colocación en un edificio de los bloques de granito, reduciendo esfuerzos y mejorando su resistencia al deterioro. La buena valoración de la calidad y la durabilidad de esta piedra berroqueña ha hecho que se solicite su designación internacional como *Global Heritage Stone Province (GHSP)* (Freire and Fort, 2015a, b) y en especial para los granitos de Alpedrete y Zarzalejo como *Global Heritage Stone Resource (GHSR)* (Freire-Lista et al, 2015d, e), ya que supone un reconocimiento a aquellas regiones que cuentan con un amplio potencial de producción y exportación a nivel mundial de esta piedra de construcción. Esta solicitud se ha realizado a través de los tres últimos artículos recogidos en esta tesis. Del mismo modo, la puesta el valor de este recurso natural se continúa con la divulgación social a través del libro del Barrio de las Letras de Madrid, donde se muestran los distintos usos que se le han dado a estos granitos, en calles y edificios de Madrid.

En todos los materiales de construcción, la anisotropía es una propiedad petrofísica interna que determina su resistencia a la agresión de los agentes inductores del deterioro (Fort et al., 2011). La porosidad y su distribución influyen en la anisotropía porque controla la capacidad de absorción del agua por parte del material, y es por eso, que la capacidad de absorber agua del granito varía según su porosidad; y así a mayor porosidad, mayor capacidad de absorción de agua, aunque en ninguno de los casos estudiados supera el valor medio de 0,5 % para la absorción y de 1 % para la porosidad efectiva. La disposición de los materiales según sus planos de anisotropía puede favorecer los procesos de deterioro al facilitar la entrada de agua. Por lo tanto, el proceso de absorción de agua que sufre la piedra natural de construcción puede verse influenciada por su grado de anisotropía. El agua tiende a ser absorbida de diferente manera según las direcciones preferentes de anisotropía que están marcadas principalmente por la disposición y distribución de la porosidad en la roca según planos preferentes.

Los valores medios de las características petrofísicas determinadas en las cuatro variedades de piedra natural estudiadas, muestran que los granitos que presentan una mayor porosidad (1-1,6%) y capacidad de absorción (0,5-0,6%), y una menor V_p (3300-3600 m/s) son los procedentes de las canteras más occidentales de la Comunidad de Madrid, Zarzalejo y Cadalso de los Vidrios, mientras que los valores más altos de V_p (4600-5200m/s) y más bajos de porosidad (0,7-0,8%) y capacidad de absorción (0,3%) se han obtenido en los granitos localizados en la zona Norte de la Comunidad, Colmenar Viejo y Alpedrete.

Para los granitos estudiados, los índices de anisotropía AD, k, As, ARS y dM son muy similares siendo el dM el que muestra los valores más bajos y As los más altos; y, los valores del índice ARS los que más se acercan a los del índice dM. Para estos índices, cuanto más se alejan de 0, más anisótropos son los materiales. El índice AD, al estar comprendido entre los valores 0 y 1, es el que más se desmarca de los valores determinados mediante los demás índices.

Aunque se puede realizar la clasificación o determinación de clases con cualquiera de los índices, se han seleccionado los índices de Gwydader y Denis (1986), dM y dm, ya que a diferencia de los otros, estos distinguen entre la anisotropía existente a nivel bidimensional (dm)

de la existente a nivel tridimensional (dM), lo cual influirá en el comportamiento hídrico de los materiales y su proceso de deterioro. Esto ofrece información complementaria para definir las clases de anisotropía al indicar en qué dirección espacial está concentrada la orientación estructural, textural y/o mineralógica que condiciona la anisotropía del material.

El proceso de clustering ha permitido establecer 5 clases (I-V) de menor anisotropía (I) a mayor (V) en los granitos de CA y CO, y sólo 3 clases de anisotropía (I-III) para los granitos de AL y de ZA, aspecto importante para establecer la calidad de las distintas variedades.

La tabla III (Fort et al., 2011) del mismo artículo muestra los valores medios de anisotropía relativa (dm) y total (dM) para cada uno de las clases establecidas, el porcentaje de probetas en cada clase, así como los valores de Vp (Vpmax, Vpmed, Vpmin y Vpmedia). Del mismo modo, se muestra el nuevo índice dMm, (dMm: dM+dm) que es uno de los parámetros que puede comparar mejor el grado de anisotropía de los materiales. Cuanto mayor es el índice dMm mayor es el grado de anisotropía de la roca.

Los valores de anisotropía total (dM) son en general bajos (3-15%) en los cuatro granitos estudiados. Aunque, cuando los valores altos del índice de anisotropía total (dM) contrastan con los bajos valores de anisotropía relativa (dm), se puede decir que el granito tiene una anisotropía más desarrollada en una de las tres direcciones del espacio y esto podría deberse a una orientación estructural, textural o composicional preferente, como es el caso de los granitos de ZA y CA, y que influye en su coeficiente capilar siendo más alto ($3,7-4,8 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$) en la dirección paralela a los planos de mayor anisotropía. Por el contrario, cuando los valores altos de dM se asimilan a los valores de dm, no existe una dirección marcada de máxima anisotropía. En este caso, toda la variedad se altera por igual en las tres direcciones y el ejemplo lo marcan los granitos de AL y CO.

La calidad de los granitos viene determinada además por la distribución de sus probetas a lo largo de las clases de anisotropía definidas (I-V). Así, siempre serán más adecuados aquellos granitos que aparezcan más en las primeras tres clases de anisotropía (AL y CO), porque

mostrarán una menor anisotropía y mayor velocidad de propagación de ultrasonidos (V_p), lo que implicará que se alteren menos, o al menos las que lo hagan de una forma más homogénea.

En definitiva, los granitos de AL y CA cuentan con mejores propiedades petrofísicas definidas por su menor anisotropía, que los granitos de CO y ZA, por lo que se convierten en el grupo de granitos procedentes de la Sierra de Guadarrama que tienen un mayor grado de calidad y resistencia.

La alta calidad y resistencia de los granitos estudiados hace que en los ensayos de envejecimiento acelerados, el número de ciclos a los que pueden verse sometidos, deban de ser mayor a los establecidos por las normas UNE-EN para poder ver una clara evidencia del deterioro. En las últimas versiones de las normas (UNE-EN 12371, 2011 y UNE-EN 14066, 2014) ya se indica la posibilidad de aumentar el número de ciclos hasta que la piedra se deteriore y sea observable.

Bajo el ensayo de envejecimiento acelerado por hielo/deshielo (Freire-Lista et al., 2015b), las propiedades petrofísicas y mecánicas de los cuatro granitos estudiados variaron relativamente poco. De los cuatro granitos, CO exhibió al final de los 280 ciclos, los valores más bajos de densidad lineal de microfisuras (2,3 microfisuras/mm) y porosidad efectiva (0,8%), y más alto del módulo elástico de Young (62-63 MPa), lo que denota una mayor resistencia al hielo/deshielo. Por el contrario, el granito de ZA mostró los valores más altos de densidad lineal de microfisuras (3,9 microfisuras/mm) y porosidad efectiva (1,9%), y más bajo del módulo elástico de Young (24 MPa), lo que denota una menor resistencia al hielo/deshielo. Pero ha sido el granito de CA, el que menos ha variado sus propiedades petrofísicas (la porosidad varía sólo un 6% y la densidad lineal de microfisuras varía un 107%) durante el ensayo, por lo que ha sido el granito que mejor se ha comportado frente a la acción del hielo/deshielo.

Durante los primeros 70 ciclos de hielo/deshielo, el desarrollo de microfisuras fue similar (54-64%) en los cuatro granitos, no aumentando en número pero sí evolucionando de un tipo de microfisura intercristalina dominante a otra intracristalina. Al final del ensayo (280 ciclos), predominó la microfisuración intracristalina en todos los granitos excepto en el de AL.

También se ha observado una escasa proliferación de microfisuras transcristalinas resultado de la coalescencia de microfisuras intercristalinas e intracristalinas previas en los cuatro granitos y durante diferentes etapas del ensayo de hielo/deshielo. La cuantificación microscópica (mosaicos superpuestos de micrografías MOP y MOF) de la microfisuras mostró que ZA exhibió el mayor número de fisuras transcristalinas, lo que facilitó la disgregación granular, consistente en una mayor pérdida de peso.

El aumento y evolución detectada en la microfisuración de estos granitos explica el aumento de la microporosidad en todas las probetas. El desarrollo de microporosidad fue mayor en el granito ZA (>25%), el granito más poroso, y menor (<8%) en el CO, el granito con menor porosidad.

La microfisuración intracristalina fue mayor en feldespatos que en cuarzos. Estas microfisuras intracristalinas aparecieron relacionadas con las direcciones de exfoliación de estos minerales y coincide con estudios de otros autores (Sousa et al., 2005, Wong et al, 2006, Manchao et al., 2010). El ensayo de hielo/deshielo indujo una presión de confinamiento a lo largo de los bordes de las fisuras, ya fueran intercristalinas o intracristalinas. Sin embargo, la microfisuración en las áreas entre cuarzo y biotita no fue muy intensa pues; la estructura laminar de la biotita proporciona la flexibilidad y ductilidad suficiente para reducir la fisuración. De acuerdo con los resultados de esta tesis, la biotita fue el mineral que desarrolló menor cantidad de microfisuras.

Las observaciones de Tuğrul y Zarif, 1999 y Yilmaz et al., 2011a indican una relación inversa entre el tamaño de feldespato potásico y la resistencia mecánica en granitos. Cuanto más grandes y rectos son los bordes cristalinos, mejor se propagarán las microfisuras intercristalinas. En el presente estudio, el mayor contenido en feldespato potásico del granito de ZA, su mayor tamaño de cristal y mayor número de microfisuras iniciales contribuyó a presentar un módulo de Young menor (27-24 MPa), lo que indica una reducción en la elasticidad de la roca y menor durabilidad Sin embargo, el granito de CO, con cristales de feldespato potásico más grandes que AL y CA, tuvo un módulo de Young mayor (67-62 MPa) pre-y post-ensayo de hielo/deshielo, indicando lo contrario. Sin embargo, el módulo de Young varió poco después del ensayo

hielo/deshielo en todas las muestras estudiadas, indicando que todos los granitos no sufrieron un deterioro interno severo, ya que las fisuras generadas no afectaron el interior de las muestras.

El ensayo de envejecimiento por choque térmico de los granitos de AL, CA, CO y ZA (Freire-Lista et al, 2015g) ha mostrado que las microfisuras preexistentes coalescieron y se desarrollaron otras nuevas a medida que el proceso de deterioro avanzaba. Cada granito se ha deteriorado en distinta medida. Para entender los mecanismos de deterioro térmico en el granito, se debe tener en cuenta el estado inicial y final de la muestra, considerando principalmente sus aspectos composicionales y texturales.

Como en el caso del ensayo de hielo/deshielo, después de 42 ciclos de choque térmico, es el granito de ZA, el que presenta mayores valores de porosidad efectiva (1,8%) y densidad lineal de microfisuras (3,3 microfisuras/mm) y menores valores de V_p (<3100 m/s) y módulo de Young (24 MPa), lo que refleja una menor resistencia a los cambios térmicos. Por el contrario, sigue siendo el granito de CO el que mejor responde con valores bajos de porosidad (0,7%) y densidad lineal de microfisuras (1,3 microfisuras/mm) y valores altos de V_p (>4900 m/s) y módulo de Young (62 MPa). Y también, ha sido el granito de CA, el que menos ha variado sus propiedades petrofísicas (la porosidad varía sólo un 0,8 %) durante el ensayo, por lo que ha sido el granito que mejor se ha comportado frente a la acción térmica.

El tamaño y porcentaje de los minerales influye en la propagación de microfisuras. La dilatación térmica es directamente proporcional al tamaño de los minerales y además depende de la forma, orientación y anisotropía de cada cristal (Gómez-Heras et al., 2008; Vázquez et al., 2010, 2015). Los granitos con textura de grano gruesa, desarrollan un deterioro mayor, como es el caso del granito de ZA, y que debido a ello ha experimentado una mayor microfisuración.

La densidad lineal de microfisuras-indica que los minerales de cada granito han respondido de distinta manera en la generación de microfisuras inter-, intra- y trancristalinos. Después del ensayo, las microfisuras intercristalinas son las que más se han desarrollado en todos los granitos. Nasser et al., 2007 ha calculado la relación entre la densidad de microfisuras intercristalinas y la densidad de microfisuras intracristalinas, en granitos sanos y sometidos a

distintas temperaturas. De este modo, CA con menor tamaño de cristal y mayor número de microfisuras intercristalinas, tiene una mayor relación que ZA. Esta relación disminuye a medida que se producen los ciclos de choque térmico, por lo que las microfisuras se desarrollan más en el interior de los minerales.

En los cristales de cuarzo (Qz), las microfisuras intracristalinas se propagan siguiendo direcciones de las microfisuras preexistentes que coalescen y se crean otras nuevas en direcciones diversas al no presentar exfoliación ni maclado.

Tanto los feldespatos potásicos (K Fsp) como las plagioclasas (Pl) exhiben dos planos de exfoliación con ángulos casi rectos, maclas o microfisuras intracristalinas preexistentes. Esta microtextura de los feldespatos va a controlar en gran medida la propagación de la microfisuras ya sean intercristalinas o intracristalinas (Freire et al., 2015c). Otra dirección preferente de propagación de microfisuras son los límites en texturas peritíticas.

La propagación de microfisuras en las plagioclasa está condicionada por su composición química y grado de alteración a minerales de la arcilla. Su zonado composicional, genera en su interior porosidad intracristalina debida a la mayor alterabilidad del núcleo (Catlos et al., 2011). Esta zona se deteriora con el efecto del choque térmico y en ella se crean microfisuras desde donde se propagan al resto del cristal.

En las biotitas (Bt) se abren los planos de exfoliación basal debido a los efectos de distensión y contracción a lo largo del eje c que producen una concentración de tensiones a lo largo de límites del cristal y deformaciones (Vázquez et al., 2015) que afectan a los minerales circundantes.

La proporción de microfisuras intercristalinas fue particularmente alta en los límites Qz-Qz y Qz-K-Fsp y Qz-Pl, mientras que fue mucho más baja en límites entre feldespatos (K Fsp-K Fsp, Pl-Pl y Pl-K Fsp) y despreciable en los límites con minerales del grupo de la biotita. Esto es debido a que el coeficiente de dilatación térmica para el Qz es considerablemente más alto que para el K-Fsp y Pl. Por otro lado, la propagación de microfisuras depende de la orientación de

los ejes de expansión de cada mineral. Cristales contiguos y con la misma orientación del eje de dilatación, generarán una anisotropía al dilatarse en la misma dirección, creando zonas con mayor presión, pudiendo llegar a generarse más microfisuras en estas zonas. Por lo tanto, granitos con mayor orientación, experimentarán más deterioro.

Los granitos cuyas canteras se encuentran en la periferia del plutón van a tener mayor orientación de sus cristales, este es el caso del granito de ZA (Freire-Lista et al., 2015e).

El aumento y evolución detectado en la microfisuración de estos granitos explica el importante incremento de la macroporosidad en los granitos de AL (200 %) y ZA (>130%) y de la microporosidad en los granitos de CA y CO (>50%). El primer grupo se asocia a los valores más altos (1.6) de relación microfisuras intercrystalia/intracrystalinas, y el segundo a los valores más bajos (1.1), aunque en todos los casos la microfisuración intercrystalina es la dominante al final del ensayo. Además en los granitos de AL y ZA hay cristales de Pl de mayor tamaño y el ensayo provoca una proliferación de microfisuras en sus núcleos.

La composición mineralógica otorga distintos parámetros cromáticos a los granitos. El leucogranito de CA tiene más altos L^* y WI iniciales debido a su menor cantidad de micas. Los valores de ΔE^* han mostrado pequeñas variaciones cromáticas debidas al choque térmico, difícilmente observables a simple vista en los 4 granitos ensayados. Destaca el granito de CO que presenta mayor incremento del parámetro b^* , lo que se traduce en un desplazamiento hacia tonos ligeramente más amarillos. Este color amarillo posiblemente se produce por la alteración de las Bt y los feldespatos, debido al inicio de la oxidación térmica del Fe^{2+} que se difunde por microfisuras. Esto da lugar a una ligera tinción, aumentando el YI .

Con respecto a la microdureza superficial de los granitos, los valores obtenidos en este trabajo oscilan entre los 802 L de ZA y los 871 L de CO (antes del ensayo de choque térmico). ZA tiene menor dureza superficial inicial debido a su mayor porosidad inicial y a sus mayores cristales de K-Fsp y Pl y a que los Qz tienen más microfisuras intracrystalinas. ZA es el granito que más reduce su dureza superficial (>5%) después del ensayo debido a su mayor densidad lineal de microfisuras (4,9 microfisuras/mm).

Por consiguiente, el ensayo de envejecimiento artificial más agresivo ha sido el de choque térmico, porque produce un mayor número de microfisuras en un número menor de ciclos. Y es el granito de ZA el que peor respuesta tiene en ambos ensayos, viendo reducida su durabilidad. La diferencia entre ambos ensayos está en el dominio de la tipología de microfisuras y en grado de penetración hacia el interior. El ensayo de hielo/deshielo genera mucha microfisuración intracristalina, mientras que el choque térmico origina más microfisuración intercristalina, y es esta la que más penetra hacia el interior de la piedra

La existencia de microfisuras debidas a la descompresión natural de los plutones en la superficie terrestre, puede explicar el deterioro que frecuentemente se produce en los sillares graníticos de edificios históricos. Los canteros tradicionales han utilizado estos planos de descompresión para extraer con mayor facilidad los sillares. La coalescencia de microfisuras de descompresión, de tipo principalmente intracristalino, debida al corte y labra tradicional, genera planos con fisuras abiertas por donde los procesos de absorción de agua capilar favorece el deterioro de los materiales; agravado en muchas ocasiones por la acción de cristalización de sales o de heladicidad (Freire-Lista and Fort, 2015d, 2016). Debido a que el paramento o cara labrada suele tener las microfisuras de descompresión dispuestas de forma paralela a la superficie y perpendicular al suelo, provocan la formación de descamados y desplacados como forma de deterioro más habitual frecuentes en las zonas bajas de muros o zócalos. Esta disposición de las microfisuras marcan los planos de anisotropía del granito favoreciendo el ascenso hídrico y facilitando su deterioro. Por el contrario, en las losas/losetas y adoquinado de los solados utilizados en patrimonio no es frecuente ver el mismo tipo de deterioro que se observan en sillares de los muros, ya que en este caso, las microfisuras de descompresión son paralelas a la superficie, haciendo más difícil el ascenso capilar. A pesar de los muchos trabajos realizados con la anisotropía de los planos de corte y el deterioro en granitos de construcción, hasta el momento muy pocos tienen en cuenta la relación de las microfisuras de descompresión con el deterioro, cuyo efecto en las propiedades petrofísicas y en la durabilidad de este material de construcción es esencial. En esta tesis se ha avanzado en este sentido (Freire-Lista y Fort,

2015d, 2016) pues es importante, para las investigaciones sobre el deterioro en sillares, el conocer qué planos anisotrópicos han sido los labrados y cómo se dispone esta dirección de anisotropía en los sillares colocados en edificios históricos, ya que condicionarán en gran medida su deterioro.

Los cambios térmicos que afectan al granito generan un aumento de la densidad y espesor de las microfisuras. Además la circulación del agua por capilaridad, la cristalización de sales y los daños sufridos por los diversos usos que se le han dado a los granitos de Alpedrete existentes en la Plaza Mayor de Madrid a lo largo de la historia, favorece el deterioro en forma de desplacado. Los desplacados se producen con mayor frecuencia en la zona inferior de los sillares, y debido al ascenso capilar que se ve favorecido por una disposición vertical de las fisuras. Además, la zona superficial de los sillares está muy afectada por microfisuras debidas a factores externos al granito de Alpedrete, como la labra y los golpes sufridos.

La acción del agua y la polución en contacto con la superficie microfisurada del granito será más agresiva y penetrativa. Las microfisuras funcionarán como vías de acceso que aceleran el deterioro químico de los minerales desde la superficie y hacia el interior o de la roca. Los feldespatos microfisurados son mucho más susceptibles al deterioro debido a la meteorización química, originando a minerales de arcilla en granitos.

Los sillares de granito de Alpedrete de las columnas de la Plaza Mayor de Madrid permiten ver una orientación en sus microfisuras. Esta lineación de las microfisuras contribuye a la generación de desplacados y descamados visibles en los sillares estudiados.

Los trabajos de puesta en valor de la piedra berroqueña es una apuesta al futuro (Freire y Fort, 2015a, b; Freire-Lista et al, 2015d, e). La denominación de la piedra berroqueña como Global Heritage Stone Province; (GHSP) y la propuesta de denominación de los granitos de Alpedrete y Zarzalejo, como Global Heritage Stone Resource (GHSR) a la International Union of Geological Sciences (IUGS) ha sido la culminación de los logros alcanzados en esta tesis para poner en valor estos geomateriales. Los estudios encaminados al patrimonio deben de tener

presente que el respeto por el patrimonio pétreo pasa por poner en valor este recurso social, económico y humano.

-9. CONCLUSIONES GENERALES

- Existe una evolución a lo largo de la historia en los materiales de construcción utilizados en Madrid. El granito de construcción ha perdurado a lo largo del tiempo, existiendo explotaciones tradicionales con producción artesanal y moderna, que exportan a otros países de la Unión Europea y del mundo.
- La piedra berroqueña está presente en el patrimonio intangible y tangible de la Comunidad de Madrid formando parte del paisaje urbano de la ciudad de Madrid.
- En base a los resultados obtenidos, la principal propiedad petrofísica que controla la alterabilidad o durabilidad de la piedra berroqueña, es la anisotropía.
- La anisotropía de la piedra berroqueña depende de su estructura y textura. Esta anisotropía está directamente relacionada con la porosidad efectiva y con la capacidad de absorción de agua capilar.
- Los índices de anisotropía que dan una mayor información sobre la calidad de los granitos son $dM\%$ y $dm\%$. La incorporación de un nuevo índice ($dMm\%$) permite comparar más fácilmente la calidad de los granitos.
- Los granitos estudiados son en general resistentes a los efectos agresivos de los ensayos de hielo/deshielo y choque térmico, siendo el choque térmico el más agresivo y el granito de Zarzalejo es el que peor responde a ambos ensayos de durabilidad.
- Las condiciones de los ensayos de hielo/deshielo y choque térmico, tales como la temperatura máxima y mínima, tasa de calentamiento y el número de ciclos deben ser estandarizados para el granito.
- La propagación de microfisuras se produce predominantemente a partir de microfisuras preexistentes.

- Los minerales más afectados en ambos ensayos fueron los feldespatos.
- Las plagioclasas han generado microfisuras pseudo-concéntricas en algunos núcleos más cálcicos y los feldespatos potásicos han desarrollado microfisuras más rectas.
- El plano de corte de la ley está determinado por la orientación de microfisuras de descompresión.
- Este plano ha sido utilizado preferentemente como paramento en los sillares de edificios históricos, aspecto que contribuye a un tipo deterioro diferencial (desplacados).
- Los desplazados y descamados son un tipo de deterioro muy frecuente en los sillares que constituyen el patrimonio construido de la Comunidad de Madrid.
- La medida de V_p y V_s y de microrrugosidad se realizan con técnicas no destructivas, portátiles y rápidas, estas técnicas dan información de las direcciones de corte.
- El tipo de cantera histórica de granito (extracción de bloques a partir de bolos o extracción por bancos) y el tipo de labra pueden determinar las características del deterioro de sillares de granito una vez puestos en obra.
- La piedra de construcción dominante en el Barrio de las Letras es la piedra berroqueña, mayoritariamente el granito de Alpedrete y Zarzalejo, seguido de la caliza de Colmenar, la piedra de Redueña y finalmente otras, como la piedra de Novelda, son testimoniales.
- Los sillares históricos del barrio de las Letras de Madrid están sufriendo continuas agresiones antrópicas.
- Las nominaciones como GHSP y GHSR de la piedra berroqueña, y de los granitos de Alpedrete y Zarzalejo, contribuirá a que todos los agentes implicados en la Provincia trabajen en el mismo sentido con respecto a la piedra berroqueña.

Estas conclusiones nos indican la necesidad de realizar estudios de procedencia y caracterización del granito, para la ubicación de canteras históricas en donde se pueda extraer granito para restauraciones. Además las técnicas portátiles utilizadas han servido para identificar

los planos de corte tradicional del granito y la óptima disposición de sillares para su colocación en obras de sustitución u obra nueva. Para la conservación de los sillares históricos de granito es importante que la sociedad tome conciencia del valor de la piedra ornamental, así como el establecimiento de una normativa enfocada a la conservación de las piedras tradicionales. El estudio científico, la limpieza respetuosa y un mimoso cuidado de la piedra berroqueña permitirán que el paseo por las calles de las ciudades y pueblos de la Comunidad de Madrid sea una experiencia única, donde el caminante se vea envuelto en una atmósfera que evoque una historia y cultura de conservación. Estas condiciones de conservación de la piedra tradicional permitirán atraer un turismo cultural que incentive el desarrollo productivo y económico de la región. Lo cual fomentará el empleo en pueblos con gran tradición cantera ya que la piedra berroqueña ha ido un importantísimo recurso económico de la Comunidad durante siglos.

10- CONCLUSIONS

Each of the papers previously presented show their own discussions and conclusions. In this section, a compilation of the most important conclusions obtained in this thesis will be made.

The Guadarrama Mountain Range has provided the different granite varieties known as Berroqueña Stone for construction purposes in the Madrid region since ancient times (Fort et al, 2013). Nowadays, its production is not only at a local and national level, but it is exported to different parts of the world (Freire and Fort, 2015a, b, Freire-Lista et al, 2015d, e). Therefore, the first five papers collect the characterization of the four most representative granites in the Guadarrama Mountain Range (Fort et al. 2011; Freire-Lista et al. 2015b, c, g) through the assessment of their petrophysical properties, thus allowing the determination of quality and durability degrees, as well as granites' most representative decay forms due to environmental induced conditions but very common in the currently world climatology. With the identification of the natural anisotropy degrees for the four considered granites and their decay forms (inter-, intra- and trans-crystalline micro-fissures), the next two papers (Freire-Lista and Fort, 2015d, 2016) highlight on how the quarrymen, without knowing it, have used since past times this natural anisotropy, which has favor granite extraction, carving and placing the stone blocks in a

building, decreasing efforts and improving the rock resistance against decay. The good assessment about the quality and durability of this Berroqueña stone made to apply for its international listing as *Global Heritage Stone Province (GHSP)* (Freire and Fort, 2015a, b), especially for Alpedrete and Zarzalejo granites as *Global Heritage Stone Resource (GHSR)* (Freire-Lista et al, 2015d, e), as a recognition to all those regions with a wide potential of production and exportation of this building stone at a world level. This application was done through the last three papers included in this thesis. At the same time, the valorisation of this natural resource is continued by the social dissemination of the book *El Barrio de las Letras de Madrid*, in which the different uses given to these granites, in Madrid streets and buildings, are shown.

Anisotropy is an internal petrophysical property in all the building materials that determine their resistance to aggressive agents instigating decay (Fort et al, 2011). Porosity and its distribution influence anisotropy by controlling the ability of the material's water absorption, and therefore, the granite water absorption varies as a function of its porosity; the higher the porosity, the higher the water absorption ability, although in none of the studied cases it surpasses and average value of 0.5% for water absorption and 1% for effective porosity.

The materials arrangement according to their anisotropy planes may favour the decay processes by facilitating the water entry. Therefore, the water absorption process that experiences the natural building stone may be influenced by its anisotropy degree. Water tends to be absorbed in a different way along the anisotropy preferential directions that are mainly marked for the rock arrangement and porosity distribution following priority planes.

The average values of the petrophysical properties determined in the four natural stone varieties, show that granites with the highest porosity (1-1.6%), water absorption ability (0.5-0.6%), and the lowest Vp (3300-3600 m/s) are those coming from the most occidental quarries of the Madrid's Community, Zarzalejo and Cadalso de los Vidrios, while the highest Vp values (4600-5200m/s), the lowest values of porosity (0.7-0.8%) and absorption ability (0.3%) have been

obtained in granites located in the Northern area of the Community, Colmenar Viejo and Alpedrete.

The anisotropy indices AD, k, As, ARS and dM for the studied granites are very similar, being dM the index that shows the lowest values, and As, the highest ones. The values of ARS index are the closest to those of dM index. The more these indices get apart from 0, the more anisotropic are the materials. AD index, with values ranging between 0 and 1 (being 0 an isotropic material) is the one more different from the values of the rest of the indices.

Although the classification or the classes determination can be done with any of the indices, the indices defined by Guydader and Denis (1986), dM and dm, have been selected for it, because unlike the other indices, these ones differentiate between the anisotropy in a bi-dimensional level (dm) and the anisotropy in a tri-dimensional level (dM), which will influence on the hydric behavior of the materials and on their decay process. This is a complementary information to define the anisotropy classes as it indicates in which of the spatial direction the structural, textural or mineralogical orientation, which conditions the material's anisotropy, is concentrated.

The clustering process allowed to establishing 5 classes (I-V) in the CA and CO granites, being I the lowest and V the highest anisotropy classes, and only 3 classes (I-III) in the AL and ZA granites, an important feature to define the quality of the different varieties.

Table III (Fort et al, 2011) of this paper shows the average values of relative (dm) and total anisotropy (dM) for each of the defined classes, the percentage of specimens in each class, as well as the Vp values (Vpmax, Vpmed, Vpmin and Vpaverage). In the same way, the new dMm index is shown, (dMm: dM+dm), one of the parameters that can better compare the materials anisotropy degree. The higher the dMm index, the greater the anisotropy of the rock.

The total anisotropy (dM) values are, in general, low (3-15%) for the 4 studied granites. When there are high total anisotropy (dM) values together with low relative anisotropy (dm) ones, it can be said that the granite has an anisotropy more developed along one of the three spatial

directions, which could be due to a preferential orientation, structural, textural or compositional, as it is the case of ZA and CA granites, and that influence in its capillary coefficient, being higher ($3.7\text{-}4.8\text{ g/m}^2\cdot\text{s}^{0.5}$) along the direction parallel to the planes that show the greatest anisotropy. On the contrary, when both indices are high and similar, it means there is not a preferential direction of maximum anisotropy. In this case, the material is altered homogeneously along the three spatial directions, being a good example of this the AL and CO granites.

The quality of granites is also conditioned by the specimens distribution in the defined anisotropy classes (I-V). Therefore, granites included in the first three anisotropy classes (AL and CO) are the most adequate ones because they will show a lower anisotropy and a higher ultrasound propagation velocity (V_p), which will imply they will be less prone to be altered, or that they will decay more homogeneously.

Definitively, AL and CA granites account for the best petrophysical properties defined by their low anisotropy, in comparison to CO and ZA granites, for what they represent the group of granites coming from the Guadarrama Mountain Range with the highest quality and strength degrees.

The high quality and resistance of these studied granites makes that in the accelerating ageing tests, the number of cycles to which the granites can be subjected must be increased with respect to those established by the UNE-EN standards in order to be able to see an evidence of decay. This possibility is already considered in the last versions of the standards (UNE-EN 12371:2011 y UNE-EN 14066:2014), increasing the number of cycles until the stone decays and that it can be observable.

With the freeze-thawing accelerating test (Freire-Lista et al., 2015b), the petrophysical and mechanical properties of the four studied granites barely varied. From the four granites, CO exhibited, after 280 cycles, the lowest values of linear density of micro-fissures (2.3 micro-fissures/mm) and effective porosity (0.8%), and the highest Young elastic modulus (62-63

MPa), which accounts for a higher resistance to freeze-thawing. On the contrary, ZA granite showed the highest values of linear density of micro-fissures (3.9 micro-fissures/mm) and effective porosity (1.9%), and the lowest value of Young elastic modulus (24 MPa), which derives in a lower resistance against freeze-thawing. CA granite was the one whose petrophysical properties varied the less (porosity varies only 6% and the micro-fissures lineal density varies 107%) during the test, being therefore the granite that has behaved the best against the freeze-thawing action.

During the first 70 freeze-thawing cycles, the micro-fissures development was similar in the four granites (54-64%), without increasing in number but evolving from a prevalent inter-crystalline to a intra-crystalline micro-fissure type. At the end of the test (280 cycles), a intra-crystalline micro-fissuring predominated in all the granites, but in AL one.

Also a scarce proliferation of trans-crystalline micro-fissures was observed, as a result of the coalescence of previous inter- and intra-crystalline micro-fissures existing in the four granites, and during the different stages of the freeze-thawing test. The microscopic quantifying by fractology (mosaics from POM and FOM micrographies) of the micro-fissures, showed that ZA granite exhibited the highest number of trans-crystalline fissures, which facilitated a grain-disintegration which derived in a greater weight loss.

The increase and evolution detected in these granites micro-fissuring explains the porosity raise in all the specimens. The micro-porosity development was greater in ZA granite (>25%), the most porous granite, and less (<8%) in CO granite, the less porous.

Fractology showed that intra-crystalline micro-fissuring was more intense in feldspar than in quartz. These intra-crystalline micro-fissures appeared related to the exfoliation directions of these minerals, coincident with the studies by other authors (Sousa et al., 2005, Wong et al, 2006, Manchao et al., 2010). Freeze-thawing testing led to a confinement pressure along the fissure edges, either inter- or intra-crystalline. Nevertheless, micro-fissuring in the areas in between quartz and biotite was not very intense due to the fact that the biotite laminar structure

provides enough flexibility and ductility to diminish fissuring. According to the results obtained in this thesis, biotite was the mineral that developed the least quantity of micro-fissures.

Observations by Tuğrul and Zarif, 1999, and Yilmaz et al., 2011a, show an inverse relation between potassium feldspar size and mechanical strength in granites. The larger and straighter are the crystal edges, the better the inter-crystalline micro-fissures will propagate. In the present study, the higher content in potassium feldspar in ZA granite, its larger crystal size and its larger number of pre-existing micro-fissures, contributed to a lower Young module (27-24 MPa), which accounts for a decrease in the rock elasticity and durability. However, CO granite, with larger potassium feldspar crystal size than AL and CA granites, showed a higher Young module (67-62 MPa), before and after freeze-thawing test, which indicates the opposite. Nevertheless, Young module scarcely varied after the freeze-thawing test in all the studied samples, which means that all the granites did not suffer a severe internal decay, as the generated fissures did not affect the interior of the specimens.

The thermal shock ageing test performed in AL, CA, CO and ZA granites (Freire-Lista et al, 2015g), showed that pre-existing micro-fissures coalesced and developed other new ones as the decay process progressed. Each granite decayed in a different way. In order to understand the thermal decay mechanisms in granite, the initial and final condition of the sample must be taken into account, mainly considering composition and texture.

As in the case of freeze-thawing test, after 42 cycles of thermal shock, is the ZA granite the one that shows greater values of effective porosity (1.8%) and micro-fissures linear density (3.3 micro-fissures/mm) and lower Vp values (<3100 m/s) and Young module (24 MPa), which reflects a lower resistance against thermal changes. On the contrary, the CO granite is still the one that behaves the best with low porosity values (0.7%) and micro-fissures linear density (1.3 micro-fissures/mm), and high Vp values (>4900 m/s) and Young module (62 MPa). CA granite was, as well, the one that varied its petrophysical properties the least (porosity only changed 0.8 %) during the test, for what it is considered the granite that behaved the best against the thermal action.

Mineral crystal size and percentage influences on the micro-fissures propagation. Thermal dilation is directly proportional to the mineral size, and also depends on the shape, orientation and anisotropy of each crystal (Gómez-Heras et al., 2008; Vázquez et al., 2010, 2015). Granites with a coarse grain size develop a greater decay, as it is the case of ZA granite, resulting in a greater micro-fissuring process.

Micro-fissures linear density is an indication of the different behavior of the distinct granite minerals with respect to inter-, intra- and trans-crystalline micro-fissures generation. After the test, inter-crystalline micro-fissures are the ones that have developed the most in all granites. Nasser et al., 2007 calculated the relation between inter- and intra-crystalline micro-fissures density, in sane granites subjected to different temperatures. Therefore, CA granite, with a smaller crystal size and a higher number of inter-crystalline micro-fissures, presents a greater relation than ZA granite. This relation diminishes as the number of thermal shock increases, resulting in a more intense development of micro-fissures in the mineral interior.

In Qz grains, intra-crystalline micro-fissures propagate following the directions of the pre-existing micro-fissures that coalesce, creating new ones along different directions as the mineral do not have exfoliation or twinning.

Both K feldspar (K Fsp) and plagioclase (Pl) exhibit two exfoliation planes with right angles, twinning or pre-existing intra-crystalline micro-fissures. This feldspar micro-texture will highly control micro-fissures propagation, either inter- or intra-crystalline (Freire et al, 2015c). Another preferential direction of micro-fissures propagation is the one defined by the limits of perthitic textures.

Micro-fissures propagation in plagioclase (Pl) is condition by its chemical composition and alteration degree to clay minerals. Its compositional zoning generates in the mineral interior intra-crystalline porosity due to the greater alterability of the nucleus (Catlos et al., 2011). This area decays with the effect of thermal shock originating in it micro-fissures that propagate towards the rest of the crystal.

In biotite, elemental exfoliation planes open as a result of the dilation and contraction effects along the c axe, which produce a stress concentration in the crystal edges and distortion (Vázquez et al., 2015) affecting the surrounding minerals.

The amount of inter-crystalline micro-fissures was particularly high in the Qz-Qz and Qz-K-Fsp and Qz-Pl limits, much lower in feldspars limits (K Fsp-K Fsp, Pl-Pl and Pl-K Fsp) and insignificant in the biotite group minerals. This is a consequence of the considerably higher thermal dilation coefficient for Qz than for K-Fsp and Pl. On the other side, the micro-fissures propagation depends on the orientation of the dilation axes of each mineral. Adjacent crystals and with the same dilation axe orientation, will derive on anisotropy when dilating in the same direction, creating areas which concentrate greater stress, which could lead to the formation of more micro-fissures in these areas. Therefore, granites more oriented, will subject a more intense decay.

Granites coming from quarries located in the pluton outskirts will provide a greater crystal orientation, being this the case of ZA granite (Freire-Lista et al., 2015e).

The detected increase and evolution of micro-fissures in these granites explains the significant raise in macro-porosity in AL (200 %) and ZA granites (>130%), and in micro-porosity in CA and CO ones (>50%). The first group is linked to the highest values (1.6) of inter- / intra-crystalline micro-fissures ratio, and the second group to the lowest values (1.1), although in all the cases the prevalent micro-fissuring at the end of the test is the inter-crystalline one. Moreover, in AL and ZA granites, there are Pl crystals larger in size, provoking the test a proliferation of micro-fissures in their nuclei.

Mineralogical composition provides different chromatic parameters to the granites. CA leucogranite shows higher L* and WI initial values due to a reduced amount in micas. ΔE^* values slightly changed after thermal shock ageing test, hardly observable at naked eye in the four tested granites. CO granite shoed the highest increase in b* parameter, resulting in a shifting towards yellowish tones. This yellowing probably is due to biotite and feldspar

alteration, by the beginning of the Fe²⁺ thermal oxidation, which diffuses along the micro-fissures. This fact derives on a slight staining, increasing YI.

With respect to surface micro-hardness of granites, the values obtained in this study range between 802 L for ZA and 871 L for CO granites (before the CT-thermal shock test). ZA granite presents a lower surface micro-hardness value as a result of its high pre-existing porosity and the larger crystal size of K-Fsp and Pl, as well as to the greater amount of intra-crystalline micro-fissures in Qz. ZA is the granite that decreases the most its surface hardness (>5%) after the ageing test as a consequence of its higher micro-fissures linear density (4.9 micro-fissures/mm).

Therefore, the most aggressive artificial ageing test was the thermal shock, because it creates a higher number of micro-fissures in less number of cycles. And ZA granite is the one that behaved the worst in both tests, decreasing their durability. The difference between both tests is the prevalence of micro-fissures typology and the penetration degree towards the interior. Freeze-thawing test originates much intra-crystalline micro-fissures, while thermal shock forms more inter-crystalline micro-fissures, being this one responsible for a deeper penetration towards the interior of the stone.

The existence of micro-fissures caused by the natural decompression of plutons in the earth surface, can explain the decay that very commonly occurs in the granite ashlar of the low parts of the buildings. Quarrymen have been using throughout history these decompressed planes to favor the block extraction. However, micro-fissures due to decompression, especially inter-crystalline ones, can coalesce, originating planes with open fissures through which capillary water absorption can take place and promote the materials decay, which in many times is worsened by salt crystallization or frost actions (Freire-Lista and Fort, 2015d, 2016). The fact that the façade or carved face uses to have the micro-fissures due to decompression arranged in a parallel mode to the surface and perpendicular to the ground surface, provokes the origin of scaling and scaling as the most frequent decay forms in low areas of walls or socles. This micro-fissures arrangement marks the anisotropy planes of the granite, promoting the hydric rise and

favoring its decay. On the contrary, in slabs, flagstones and paving used in heritage, it is not common to see the same decay as can be observed in wall ashlar, because in that case the decompression micro-fissures are parallel to the surface, making more difficult the capillary rise. In spite of the numerous studies focused on the anisotropy of the cutting planes and on the decay of building granites, up to now, very few take into account the connection between the decompression micro-fissures and decay, whose effect on the petrophysical properties and durability of this building material is essential. This thesis takes a step forward in this regard (Freire-Lista y Fort, 2015d, 2016), because it is important, for the ashlar decay research, knowing which anisotropy planes were cut/carved and how this anisotropy direction is arranged in the ashlar placed in heritage buildings, as they will very much condition their decay.

The thermal changes affecting granite originate an increase in micro-fissures density and thickness. In addition, capillary water circulation, salt crystallization and damages due to the different uses given to the existing Alpedrete granites in Plaza Mayor (Main Square) in Madrid throughout history, promotes the scaling decay form.

Scaling occurs more commonly in low parts of the ashlar, and due to the capillary rise that is favored by a vertical arrangement of the fissures. Moreover, the surface area of the ashlar is deeply affected by micro-fissures caused by agents external to Alpedrete granite, such as cutting/carving and blows/impacts.

The action of water and pollution in contact with the micro-fissured granite surface will be more aggressive and penetrative. Micro-fissures will act as access routes that accelerate the chemical decay of minerals, from rock surface towards its interior. Micro-fissured feldspars are much more sensitive to decay due to chemical meteorization, forming clay minerals in granite.

The Alpedrete granite ashlar of the columns in Plaza Mayor allow to observing an orientation in the micro-fissures. This micro-fissures lining-up contributes to the generation of scaling and scaling visible in the studied ashlar.

The works to put into value the berroqueña stone are a future investment (Freire and Fort, 2015a, b; Freire-Lista et al, 2015d, e). Listing Berroqueña Stone as a Global Heritage Stone Province; (GHSP) and the proposal for listing Alpedrete and Zarzalejo granites for Global Heritage Stone Resources (GHSR) to the International Union of Geological Sciences (IUGS) have been the zenith to the milestones achieved in this thesis to put into value these geomaterials. Studies aimed to heritage must consider that the respect for the stone heritage needs to put into value this social, economic and human resource.

-11. GENERAL CONCLUSIONS

- Throughout history the use of building materials in Madrid has evolved. There is an evolution throughout history in the use of building materials in Madrid. Building granites have endured over time, existing traditional quarries utilizing both artisanal and modern production, have been exporting to other countries in the European Union and around the world.
- The piedra berroqueña is present in the tangible and intangible heritage of the Community of Madrid forming part of the urban landscape of the city of Madrid.
- According to the results obtained, anisotropy is the main petrophysical property that influences the durability of piedra berroqueña.
- The anisotropy of piedra berroqueña depends on its structure and texture. This anisotropy is directly related to the effective porosity and its capacity of to absorb water by capillary action.
- The Anisotropy indices that give more information about the quality of the granites are $dM\%$ and $dm\%$. The incorporation of a new index ($DMm\%$) allows the quality of the granites to be compared more easily.
- The studied granites are generally resistant to the aggressive effects of the freeze / thaw and thermal shock tests, the latter being the most aggressive test. Zarzalejo granite had the worst response in both durability tests.

-The conditions of the freeze / thaw and heat shock tests, such as maximum and minimum temperature, heating rate and the number of cycles should be standardized for granite.

-The propagation of microcracks occurs predominantly from preexisting microcracks

-The most affected mineral in both tests have been feldspars.

-The plagioclases have generated pseudo-concentric microcracks in some of the more calcified cores and potassium feldspars developed straighter microcracks.

Plagioclases generated pseudo-concentric microcracks and feldspars developed straighter microcracks.

- The splitting plane called rift is determined by the orientation of the exfoliation microcracks.

- The granite rift plane has been preferably used as the facing of historic buildings, an aspect that contributes to a type of differential decay (scaling).

-Scaling is a common type of decay present in the ashlar that constitute the built heritage of the Community of Madrid.

-The V_p, V_s and microroughness measures are obtained using non-destructive, portable and rapid techniques, which give information about the splitting planes.

- The type of historic granite quarry (tors or banks quarries) and carving styles may determine the ashlar decay characteristics.

-The more common building stone in the Barrio de las Letras is the piedra berroqueña, mainly granite of Alpedrete and Zarzalejo, followed by limestone of Colmenar, piedra de Redueña and others, such as stone of Novelda.

-The historical ashlar of the Barrio de las Letras district of Madrid are suffering ongoing anthropogenic damage.

-The Nominations as GHSP and GHSR of piedra berroqueña and Alpedrete and Zarzalejo granites, will help all those involved in the Province working in the same direction relative to the piedra berroqueña.

These findings indicate the need to perform studies of sourcing and characterization of the granite in order to identify historical quarries where granite can be removed for restoration purposes. In addition, portable techniques were used to identify the traditional granite cutting planes and optimum arrangement of stones in replacement or new construction work. For the preservation of historic granite blocks it is important that society is aware of the value of ornamental stones, and the establishment of laws aimed at preserving traditional stones. Scientific study, appropriate cleaning and special care of piedra berroqueña will permit walk through the streets of the cities and towns of the Community of Madrid to be a unique experience, where walkers will be immersed in an atmosphere that evokes a story of culture and conservation. The appropriate conservation of traditional stones will facilitate cultural tourism that encourages productive and economic development of the region which in turn will promote employment in those towns where the traditional quarrying of the piedra berroqueña stone has been an important economic resource of the Community for centuries.

-12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcalde Moreno, M., y Villegas Sánchez, R., 2003. Indicadores de alteración de los materiales pétreos. In: R. Villegas Sánchez y E.M. Sebastián Pardo (Editores), Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Comares, Granada, .58-71.
- Almagro-Gorbea, M., y Maier, J., 2012. De Pompeya al Nuevo Mundo. La Corona española y la arqueología en el siglo XVIII, Madrid, Real Academia de la Historia - Patrimonio Nacional, 333-360. ISBN 978-84-15069-38-6.
- Alonso, F.J., Vázquez, P., Esbert R.M., y Ordaz, J., 2007. Influence of measuring conditions on roughness parameters of ornamental rocks." Workshop: Preservation of Natural Stone and Rock Weathering, Taylor & Francis, 13-16.
- Alonso, F. J., Vázquez, P., Esbert, R. M., y Ordaz J., 2008. Durabilidad de granitos ornamentales: valoración de los daños inducidos por el ensayo de cristalización de sales" Materiales de Construcción, 58: 191-201.
- Álvarez de Buergo, M., y González, T., 1994. Estudio del método de la medida de la velocidad de propagación del sonido y su aplicación a edificios históricos". Ingeniería Civil, 94: 69-74.
- Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Varas, M.J., Gómez-Heras, M., 2004. Panteón de Hombres Ilustres, Madrid, Spain: Building Materials, Degradation and Conservation. Proceedings of the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Influence of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage (eds L. Aires Barros & F. Zezza). Lisboa.
- Álvarez de Colmenar, J., 1707. Les delices de l'Espagne & du Portugal: où l'on voit une description exacte des antiquitez, des provinieses...]- Leide: chez Pierre Vander Aa.
- Alves, C., Sequeira Braga, M. A., y Hammeker., C., 1996. Water transfer and decay of granitic stones in monuments. Surface Geosciences, 397-402.
- Anders, M.H, Laubach, S.E., y Scholz, C.H., 2014. Microfractures: A review. Journal of Structural Geology, 69: 377-394.
- Andrés de Pablo, N., y Palacios D., 2004. Interrelación nieve/geomorfología en la Sierra de Guadarrama: altas cuencas del Ventisquero de La Condesa y Vademartín, 30: 85-116. ISSN 0211-6820
- Ansted, M.A., F.R.S., 1860. On the decay and preservation of building materials. Journal of the Franklin Institute, 70 (4): 217-223.
- Arikan, F., Ulusay, R., y Aydin, N., 2007. Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system - Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66: 415-430.
- Baltuille, J.M., Alfonso de Molina, F., Gazapo, C., y Vivar, V., 2004. Primeros resultados de una nueva lanza térmica de gas (gas flame-jet) de cara a sus aplicaciones en canteras de granito. Ventajas medioambientales. Geotemas (Madrid), 6 (1): 247-250.
- Bails, B., 1802. Diccionario de arquitectura civil. Imprenta de la viuda de Ibarra, Madrid, 91 pp.

- Baker, I.O., 1890. A treatise on masonry construction. New York, John Wiley and Sons, 598 pp.
- Begonha, A., y Braga, M.A.S., 2002. Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties – *Catena*, 49: 57-76.
- Bell, F.G., 1993. Durability of Carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, 21: 187-200.
- Benavente, D., Martínez-Verdú, F., Bernabéu, A., Viqueira, V., Fort, R., García del Cura, M.A. Illueca, C., Ordóñez, S., 2003. Influence of Surface Roughness on Color Changes in Building Stones. *Color Research and Application*. 28 (5): 343-351.
- Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R., Ordoñez, S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74: 113-127
- Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Cueto, N., y García-del-Cura, M. A., 2007. Salt weathering in dual-porosity building dolostones. *Eng. Geol.* 94: 215-26.
- Benavente, D., Cultrone, G., y Gómez-Heras, M., 2008. The combined influence of mineralogical, hygric y termal properties on the durability of porous building stones - *European Journal of Mineralogy*, 20: 673-685.
- Benito-López, J.E., García Valero, M.A., Garrido Pena, R., y Muñoz López-Astilleros, K., 1996a. La necrópolis medieval de “La Mezquita” (Cadalso de los Vidrios, Madrid): Resultados de la última campaña de excavación, *Estudios de Prehistoria y Arqueología Madrileñas*, 10: 121-129.
- Benito-López, J.E., García Valero, M.A., Garrido Pena, R., y Muñoz López-Astilleros, K., 1996b. Excavación arqueológica de urgencia en la necrópolis medieval de “La mezquita” (Cadalso de los Vidrios), *Reunión de Arqueología Madrileña*, 188-190.
- Benito-López, J.E., García Valero, M.A., Garrido Pena, R., y Muñoz López-Astilleros, K., 1996c. Excavación arqueológica en la necrópolis medieval de “La Mezquita”, *Revista de Arqueología*, 180: 52-55.
- Benito Pradillo, M.A., 2011. La Catedral de Ávila, evolución constructiva y análisis estructural. Tesis doctoral no publicada, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Benkó, Z., Molnár, F., Lespinasse, M., y Váczi, T., 2014. Evidence for exhumation of a granite intrusion in a regional extensional stress regime based on coupled microstructural and fluid inclusion plane studies-An example from the Velence Mts., Hungary. *Journal of Structural Geology*, 65: 44-58.
- Berrocal-Rangel, L., 2004. La defensa de la comunidad. Sobre las funciones emblemáticas de las murallas protohistóricas en la Península Ibérica. *Gladius*, 24: 27-98.
- Berrocal-Rangel, L., y Moret, P. (Coordinadores), 2007. Paisajes fortificados de la Edad de Hierro. Las murallas protohistóricas de la meseta y la vertiente atlántica en su contexto europeo. Actas del coloquio celebrado en la Casa de Velázquez (Octubre de 2006). *Bibliotheca Archaeologica Hispana* 28. Real Academia de la Historia. I.S.B.N.: 978-84-95983-91-6. Casa de Velázquez. I.S.B.N.: 978-84-96820-10-4. Fotocomposición e impresión: Taravilla Mesón de Paños, 6. 28013 Madrid. 355 pp.

- Birch, F., 1961. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2 J. Geophys. Res. 65 (4): 1083–1102.
- Bourges, A., 2006. Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment. PhD diss., Universitat Munchen. http://edoc.ub.uni-muenchen.de/5505/1/Bourges_Ann.pdf.
- Brandi, C., 1977. Teoría de la restauración - Alianza Editorial, 149 pp.
- Brimblecombe, P., 2003. The Effects of Air Pollution on the Built Environment, " Imperial College Press. Peter Brimblecombe (Ed.): 428 pp.
- Brimblecombe, P., y Sturges, K., 2009. "History of atmospheric environment." Atmospheric Environment, 43 (1): 2-8.
- Bromblet, P., Bernabé, E., y Vergès-Belmin, V., 1996. Petrophysical investigation on the origin of scaling of a microgranular magmatic rock associated to granite in the monuments from Brittany (France) - Environmental Protection and Conservation of the European Cultural Heritage - Degradation and Conservation of Granitic Rocks, European Commission, 73-78.
- Bromley, W., 1702. Several years travels through Portugal, Spain, Italy...Performed by a Gentleman. Londres, imprenta A. Roper.
- Brotóns Torres, V., Tomás Jover, R., Ivorra, S., y Alarcón, J.C., 2013. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. Engineering Geology, 167: 117-127.
- Brotóns Torres, V., Tomás Jover, R., Ivorra, S., y Grediaga, A., 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73: 791-799.
- Cabello, P., 1993. Política investigadora de la época de Carlos III en el área maya. Ediciones de la Torre, 206 pp. ISBN 9788479600105.
- Camino Mayor, J., 2000. Las murallas compartimentadas en los castros de Asturias: bases para un debate, AEspA, 73: 27-42.
- Camuffo, D., 1995. Physical weathering of stones - The Science of the Total Environment, 167: 1-14.
- Camuffo, D., 1998. Microclimate for Cultural Heritage." Elsevier Science; Developments in Atmospheric Science, 26: 428 pp.
- Crespo Fernández, M., 2011. Aproximación al estudio del yacimiento arqueológico de “La Mezquita” (Cadalso de los Vidrios, Madrid): nuevas aportaciones científicas. Estrat Crític, 5.2: 426-434.
- Del Río, L.M., López, F., Esteban, F.J., Tejado, J.J., Mota, M.I., González, I., Ramos, A., y San Emeterio, J.L., 2005. Ultrasonic Study of Alteration Processes in Granites Caused by Freezing and Thawing. Ultrasonics Symposium IEEE, 1: 415-418.
- Cano de Gardoqui García, J.L., 1991. Antecedentes de la arquitectura Barroca Española: Las cubiertas de pizarra en las obras reales de Felipe II y su tránsito al siglo XVII. Artículo leído como ponencia en el Congreso organizado por la Carl Justi-Vereinigung celebrado en

München mayo de 1991 bajo el tema “Spanische und Portugiesische Kunst des 17. Jahrhunderts”, 291-300.

- Caneva, G., Nugari M.P., y Salvadori, O., 1991. *Biology in the Conservation of Works of Art* – ICCROM, 182 pp.
- Capel Sáez, H., Sánchez, J.E., y Moncada, O., 1988. *De Palas a Minerva: la formación científica y la estructura institucional de los ingenieros militares en el siglo XVIII*. Editorial CSIC - CSIC Press, 390 pp.
- Carter, F., 1772. *A Journey from Gibraltar to Malaga: with a view of that garrison and its environs; a particular account of the towns in the Hoya of Malaga... and thirteen plates engraved from original drawings, taken in the year*. – London. F. Nichols.
- Carvajal, A.I.M., 1985, *La ciudad militar en dos tratados de fortificación del siglo XVI*. La Ciudad Hispánica. Editorial de la Universidad Complutense, 51-63.
- Casquet, C., Montero, P., Galindo, C., Bea, F., y Lorenzo, R., 2004. Geocronología $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ en cristal único de circonio y Rb-Sr del Plutón de la Cabrera (Sierra del Guadarrama). *Geogaceta*, 35: 71-74.
- Catlos, E., Baker C., Sorensen S., Jacob L., y Çemen I., 2011. Linking microcracks and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: Evidence from the Salihli and Turgutlu plutons in western Turkey (Menderes Massif). *Journal of Structural Geology*, 33: 951-969.
- Chabas, A., y Jeannette, D., 2001. Weathering of marbles and granites in marine environment : petrophysical properties and special role of atmospheric salts - *Environmental Geology*, 40 (3): 359-368.
- Chen, Y., Nishiyama, T., Kusuda, H., Kita, H., y Sato, T., 1999. Correlation between microcrack distribution patterns and granitic rock splitting planes. *Int. J. Rock Mech. Min.* 36: 535-541.
- Chen, Y., Kobayashi, T., Kuriki, Y., Kusuda, H., y Mabuchi, M., 2008. Observation of microstructures in granite samples subjected to one cycle of heating and cooling. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*. 49(4): 217-226.
- Chigira, M. 2001. Micro-sheeting of granite and its relationship with landsliding specifically after the heavy rainstorm in June 1999, Hiroshima Prefecture, Japan. *Engineering Geology*. 59: 219–231.
- Crosby, W.O., y Loughin, G.F., 1904. *The Building Stones of Boston and vicinity*, Tech. Quarterly, 17: 165-185.
- Coussy, O., y Fen-Chong, T., 2005. Mecanismo de cristalización, relajación de poros y microcristalización en materiales porosos cohesivos. *C. R. Méc*, 333 (6): 507-512.
- Currier, L.W., 1960. Geologic appraisal of dimension-stone deposits: U.S. Geological Survey Bulletin, 1109: 78 pp.
- Cruz Freire, P., 2013. El ingeniero militar Ignacio Sala, gobernador y comandante general de Cartagena de Indias. Noticias de su pase a indias y de su labor en las defensas de la ciudad. *Laboratorio de Arte*, 25: 469-481, ISSN 1130-5762.

- Dale, T. N., 1908. Chief commercial granites of Massachusetts, New Hampshire and Rhode Island, Department of the interior United States Geological Survey. Bulletin, 354: 228 pp.
- Dale, T.N., 1923. The commercial granites of New England: U.S. Geol. Survey. Bull, 521 pp.
- De Laet, V., van Loon, G., Van der Perre, A., Deliever, I., y Willems, A., 2015. Integrated remote sensing investigations of ancient quarries and road systems in the Greater Dayr al-Barsha Region, Middle Egypt: a study of logistics. *Journal of Archaeological Science*, 55: 286-300.
- De la Torre, R., Sancho, L.G., Horneck, G., de los Ríos, A., Wierzchos, J., Olsson-Francis, K., Cockell, S.C., Rettberg, P., Berger, T., de Vera, J.P.P., Ott, S., Martínez Frías, J., Gonzalez Melendi, P., Lucas, M.M., Reina, M., Pintado, A., y Demets, R., 2010. Survival of lichens and bacteria exposed to outer space conditions - Results of the Lithopanspermia experiments. *Icarus*, 208: 735-748.
- De Muynck, W., De Belie, N., y Verstraete, W., 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, 36 (2): 118-136.
- De Oliveira Castello Branco, H.D., y Cruz Souza, L.A., 2002. Rock art conservation in the Peruacu valley, Minas Gerais, Brazil. In 13th Triennial Meeting, ICOM Committee for Conservation, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002: Preprints, ed. R. Vontobel, 556-59. London: James & James (Science Publishers) Ltd.
- Del Monte, M., Ratazzi, A., Romao, P., Rossi, P., 1996. The role of lichens in the weathering of granitic Buildings." *Degradation and Conservation of granitic rocks in monuments. Environmental protection and conservtaion of the European cultural Heritage*, 301-306.
- Delgado Rodrigues, J., 1983. Laboratory study of thermally fissured rocks – *Memória*, 583: 281-294. LNEC, Lisboa.
- Del Río, L.M., López, F., Esteban, F.J., Tejado, J.J., González, M.I., Ramos, A., y San Emeterio, J.L. 2005. Ultrasonic study of Alteration Processes in Granites Caused by Freezing and Thawing. *IEEE Ultrasonic Symposium*.
- De Lucca, D., 2012. *Jesuits and Fortifications: The Contribution of the Jesuits to Military Architecture in the Baroque Age*. Brill, 389 pp.
- De Thury, H., 1828. On the method proposed by Mr Brard for the immediate detection of stones unable to resist the action of frost. *Annales de de Chemie et de Physique*, 38: 160-192.
- Díaz-Pache, F., 2001. *Partículas de contaminación en ambientes urbanos: su interacción con la piedra de edificación (Catedrales de Burgos y Oviedo)*." Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- Dillon, J.T., 1782. *Travels through Spain with a view to illustrate the Natural History and physical Geography...* Interspersed with historical anecdotes. London: R. Balwin, ..., 459 pp.
- Doehne, E., y Price, C.A., 2010. *Stone Conservation: An Overview of Current Research*, (segunda edición), 159 pp. ISBN: 978-1-60606-046-9 (pbk.).

- Earle Radcliffe, C., John, C., y Richards, 1956. Theophrastus on Stones: Introduction, Greek text, English translation, and Commentary: Ohio State University, 238 pp.
- Eberhardt, E., Stimpson, B., y Stead, D., 1999. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress induced brittle fractures - Rock Mechanics and Rock Engineering, 32: 81-99.
- Eckel, E.C., 1912. Building stones and clays: New York, John Wiley and Sons, 465 pp.
- Erguler, Z.A., 2009. Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs. Engineering Geology, 105: 186-199.
- Erguler, Z.A., y Shakoor. A., 2009. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. Engineering Geology, 108: 36-42.
- Esbert, R.M., Marcos, R. M., Ordaz, J., Montoto, M., Suárez del Río, L. M., Ruíz de Argandoña, V. G., Calleja, L., Alonso, F.J., y Rodríguez-Rey, A., 1989. Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Catalunya, España." Materiales de Construcción, 39 (214): 37-47.
- Esbert, R.M., Ordaz, J., Alonso, F.J., Montoto, M., González-Limón, M.T., Álvarez de Buergo, M. 1997. Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Manuals de Diagnosis. Col·legi d'Àparelladors I arquitectes tècnics de Barcelona, Barcelona, 139 pp.
- Esbert, R. M., Díaz-Pache, F., Grossi, C.M., Alonso, F.J., y Ordaz, J., 2001. Airborne particulate matter around the Cathedral of Burgos (Castilla y Leon, Spain)." Atmospheric Environment, 35(2): 441-452.
- Esbert, R.M., 2007. Alteración de rocas graníticas utilizadas en edificación. Materiales de Construcción, 58 (288): 77-89.
- Espinosa, P. C., 1859. Manual de Construcciones de Albañilería, 448 pp.
- Fernández de Moratín, L., Siglo XVIII. Apuntaciones sueltas de Inglaterra [Manuscrito en cuatro cuadernos], 92 pp.
- Fernández Salas, J. 1996. Geometría y función estructural en cantería. La cantería y la estereotomía de la piedra en el aprendizaje del arte de construir y otras consideraciones. En: Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa (eds.). CEHOPU. Madrid.
- Fernández Suárez, J., 2013. Investigación, evaluación y ordenación minero-ambiental-social de los recursos de Rocas y Minerales Industriales de la Zona Central de Asturias. Tesis doctoral sin publicar. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo. Universidad de Oviedo.
- FEMP, 2015. Federación Española de Municipios y Provincias, Carta Local, 277: 20-23.
- Fleuriot, Jean-Marie-Jérôme., 1796. Voyage en Espagne- Cinquieme edition. Avec figures et Carte géographique. - Paris: Chez J.J. Lucet, (Al fin: Imp. Beauvais), 4 h., 262 p., 1 h.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E.M., y Varas M.J., 2010. Characterisation of monzogranitic batholiths as a supply source for heritage construction in the northwest of Madrid: Engineering Geology, 115: 149-157.

- Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Álvarez De Buergo Ballester, M., y Freire-Lista, D.M., 2011. Determination of anisotropy to enhance the durability of natural Stone. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8: 132, 144.
- Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E., Gómez-Heras, M., Varas, M.J., y Freire-Lista, D.M., 2013a. Evolution in the use of natural building stone in Madrid, Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46 (4): 421-429.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., y Perez-Monserrat, E.M., 2013b, Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 61: 296-305.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., y Varas-Muriel, M.J., 2014a. Durability of “Alpedrete granite”, a traditional construction material (Madrid, Spain). Libro de resúmenes de la European Geosciences Union General Assembly 2014. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 14, EGU2014-668.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., y Varas-Muriel, M.J., 2014b. Fisuración por acción del hielo en tres granitos utilizados en construcción. CD-ROM artículos del congreso latinoamericano sobre “Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio” Rehabend 2014. ISBN 978-84-616-8863-0 pg. 438-445. ISBN del libro de resúmenes 978-84-616-8862-3 2014. pag 119-119.
- Freire-Lista, D.M., y Fort, R., 2015a. The Piedra Berroqueña region: candidacy for Global Heritage Stone Province status. *Geoscience Canada*.
- (<https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/issue/view/1603>)
- Freire-Lista, D.M., y Fort, R., 2015b. The region of the Piedra Berroqueña: A potencial Global Heritage Stone Province. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 17, EGU 2015-3047-1, 2015. EGU General Assembly 2015.
- Freire-Lista, D.M., y Fort, R., 2015c. Anisotropy in Alpedrete granite cutting (Rift, Grain and Hardway directions) and effect on bush hammered heritage ashlar. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 17, EGU2015-9426-1, 2015. EGU General Assembly 2015.
- Freire-Lista, D.M. y Fort, R., 2015d. Origen y evolución de desplazados y descamados en el granito de la Plaza Mayor de Madrid. En: Libro de Actas del Congreso del Congreso Nacional: Estudio y Conservación del Patrimonio Cultural - 2015 (ECPC - 2015), Organizado por TECHNOHERITAGE y la Universidad de Málaga. Málaga.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., y Varas-Muriel, M.J., 2015a. Nomination of Zarzalejo granite, a Spanish heritage building stone, as a “Global Heritage Stone Resource”. *Energy Procedia*. 76: 642-651.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., y Varas-Muriel, M.J., 2015b. Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Regions Science and Technology*. 113: 40-51.
- Freire-Lista, D.M., Gomez-Villalba, L.S., y Fort, R., 2015c. Microcracking of granite feldspar during thermal artificial processes. *Periodico di Mineralogia*. V. 82 (in press).
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015d. Alpedrete granite (Spain). A nomination for the “Global Heritage Stone Resource” designation. *Episodes*, 38 (2):106-113.

- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015e. Zarzalejo granite (Spain). A nomination for Global Heritage Stone Resource. *Energy Procedia*, 76: 642-651.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., y Varas-Muriel, M.J., 2015f. Zarzalejo granite (Spain). A nomination for Global Heritage Stone Resource. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 17, EGU2015-3049-1, 2015. EGU General Assembly 2015.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J., 2015g. Thermal shock-induced microcracking in building granite. *Engineering Geology* (en revisión).
- Freire-Lista, D.M. y Fort, R., 2016. Microfisuras de descompresión y direcciones de corte en granito de construcción. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (pendiente de envío)
- Galindo Díaz, J.A., 1996. El conocimiento constructivo de los ingenieros militares españoles del siglo XVIII. Un estudio sobre la formalización del saber técnico a través de los tratados de arquitectura militar. Tesis doctoral no publicada.
- García-del-Cura, M.A, Benavente, D, Bernabéu, A., y Martínez-Martínez, J., 2008. The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers. *Materiales de Construcción*, 58 (289-290): 65-79.
- Gómez Heras, M., Benavente, D., Alvarez de Buergo, M., y Fort, R., 2004. Soluble salt minerals from pigeon droppings as potential contributors to the decay of stone based cultural heritage. *Eur. J. Mineralogy*, 16: 505-509.
- Gómez-Heras, M., 2005. Procesos y formas de deterioro térmico en piedra natural del patrimonio arquitectónico. Tesis de doctorado. Universidad Complutense de Madrid.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J., Fort, R., 2006. Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology* 78 (3-4): 236-249.
- Gómez-Heras, M., Smith, B.J. y Fort, R., 2008. Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty. *Environmental Geology*, 56: 547-560.
- Gómez-Heras, M., McCabe, S., Smith B.J., Fort, R., 2009. Impacts of Fire on Stone-Built Heritage: An Overview. *International Journal of Architectural Heritage*, 2 (15): 47-59.
- Gorbushina, A.A., 2007. Life on the rocks. *Environmental Microbiology*, 9 (7): 1613-1631.
- Grossi, C.M., Esbert, R.M., y Díaz-Pache, F., 1998. Decay and durability of building stones in urban environments." *Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos*, 252: 5-25.
- Guydader, J., y Denis, A., 1986. Propagation des ondes dans les roches anisotropes sous contrainte évaluation de la qualité des schistes ardoisiers. *Bull. Eng. Geol.* 33: 49-55.
- Gupta, A.S., y Seshagiri Rao K., 1998. Index properties of weathered rocks: interrelationship and applicability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57: 161-172.
- Hale, J.R., y Han, J.R., 1977. Renaissance fortification. Art or engineering?, Londres, 25 pp.

- Hall, K., 1999. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*, 31: 47-63.
- Hall, K., Thorn, E., y Sumner, P., 2012. On the persistence of ‘weathering’ *Geomorphology*, 149-150: 1-10.
- Hall, K., y Thorn, E., 2014. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: An attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*, 206: 1-13.
- Hamdi, E., Bouden Romdhane, N., du Mouza, J., y Le Cléac’h, J.M., 2008. Fragmentation energy in rock blasting. *Geotech. Geol. Eng.*, 26: 133-146.
- Hamdi, E., Bouden Romdhane, N., Le Cléac’h, J.M., 2011. A tensile damage model for rocks: application to blast induced damage assessment. *Comput. Geotech.*, 38: 133-141.
- Hamdi, E., y Lafhaj, Z., 2013. Microcracking based rock classification using ultrasonic and porosity parameters and multivariate analysis methods. *Engineering Geology*, 167: 27-36.
- Harrell, J.A., y Storemyr, P., 2009. Ancient Egyptian quarries—an illustrated overview. In Abu-Jaber, N., Bloxam, E.G., Degryse, P. and Heldal, T. (eds.) *QuarryScapes: ancient stone quarry landscapes in the Eastern Mediterranean*, Geological Survey of Norway Special Publication, 12: 7-50.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1914. Las pinturas prehistóricas de Peña Tu (Asturias). *Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas*, 2. 35 pp.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1920. «Comunicación respecto a los Parques nacionales y a los Monumentos naturales de España». *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 20: 267-282.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1930. «Reorganización de la Junta de Parques Nacionales y designación de Sitios y Monumentos Naturales y de Interés Nacional». *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 30: 78-81.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1944. El Museo de Ciencias Naturales y sus naturalistas de los siglos XVIII y XIX. *Publicaciones del Museo Nacional de Ciencias Naturales*, 81pp.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1952. El solar en la Historia Hispana. *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Serie de Ciencias Naturales*, 15: 766 pp. Madrid.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1955 y 1956. *Fisiografía del Solar Hispano* (2 vol.). *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Serie de Ciencias Naturales*, 16 (1 y 2). 665-793. Madrid.
- Hernández-Pacheco y Esteban, E., 1959. *Prehistoria del Solar Hispano*. *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Serie de Ciencias Naturales*, 20. Madrid.
- Hirschwald, J., 1908. *Die Prufung der naturlichen Bausteine auf ihre Wetterbestandigkeit* - Ernst and Sohn, Berlin.
- Hirschwald, J., 1912. *Handbuch Der Bautechnischen Gesteinsprüfung Für Beamte Der Materialprüfungsanstalten Und Baubehörden, Steinbruchingenieure, Architekten Und. Der Technischen Hochschulen* (German Edition).

- Hoffmann, D., y Niesel, K., 1992. Pore structure of rendering as a feature of its weathering - 7th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, 611-620.
- Hor, M., y Morihiro, H., 1998. Micromechanical analysis on deterioration due to freezing and thawing in porous brittle materials. *Int. J. Eng. Sci.*, 36 (4): 511-522.
- Howe, J., y Allen., 1910. *The geology of building stones*. London: E. Arnold, 455 pp.
- Howe, J., y Allen, J. A., 1920. *Stones and quarries*, London: Sir I. Pitman & sons, Ltd., New York.
- Hudec, P.P., 1998. Rock properties and physical processes of rapid weathering and deterioration - 8th International IAEG Congress, Rotterdam, 335-341.
- Ibañez-Velasco, A., Rodríguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Estudio Experimental del Efecto de Aditivos Orgánicos en la Cristalización de Na_2CO_3 , 2015. *Macla*, revista de la sociedad española de mineralogía. 20: 71-72.
- Jacq, C., 1975. *La franc-maçonnerie*. Éditions Robert Laffont, S.A. Traducción al castellano: Serrat Crespo, M., 2004. *La masonería, historia e iniciación*. Ediciones Martínez Roca, S. A. 132 pp.
- Jeannette, D., 1997. Importance of the pore structures during the weathering process of stones in monuments - In. *Soils and Sediments, Mineralogy and Geochemistry*; Paquet, H., Clauer, N., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 177-190.
- Jessell, M.W., Cox, S.J.D., Schwarze, P., Power, W.L., 1995, The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique, *Special Publication of Geological Society, London*, 92: 27-37.
- Jiménez González, I., 2008. Efectos de los ciclos de humedad-sequedad en el deterioro de rocas ornamentales que contienen minerales de arcilla, tesis doctoral no publicada. Universidad de Granada, Facultad de Bellas Artes.
- Julien, A.A., 1884. The durability of building stones in New York City and vicinity: U.S. Dept. Commerce 10th Census, 364-393.
- Khanlari, G., y Abdilor, Y., 2014. Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran. *Bull. Eng. Geol. Environ.* DOI 10.1007/s10064-014-0691-8.
- Khan, S.S., y Ahmad, A., 2004. Cluster center initialization algorithm for k-means clustering. *Pattern Recognition Letters*. 25: 1293-1302
- Kessler, D.W., 1919. Physical and chemical tests on the commercial marbles of the United States: U.S. Bur. Standards Tech. Paper 123.
- Kessler, D.W. y Sligh, W.H., 1927. Physical properties of the principal commercial limestones used for building construction in the United States US National Bureau of Standards Technical Paper.
- Koch, A., y Siegesmund, S., 2004. The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46: 350-363.

- Kovács, T., 2009. Durability of crystalline monumental stones in terms of their petrophysical characteristics. Tesis doctoral no publicada. Univerisdad de Oviedo.
- Kühnel, R.A., 2002. Driving forces of rock degradation - Protection and Conservation of the Cultural Heritage of Mediterranean Cities, Eds.: Galán and Zezza, Swets and Zeitlinges, Lisse, 11-17.
- La Russa, M.F., Belfiore, C.F., Comite, V., Barca, D., Bonazza, A., Ruffolo, S.A., Crisci, G.M., Pezzino, A. 2013. Geochemical study of black crusts as a diagnostic tool in cultural heritage. *Applied Physics A*, 113 (4): 1151-1162.
- Laubach, S.E., Olson, J.E., y Gale, J.F.W., 2004. Are open fractures necessarily aligned with maximum horizontal stress. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 191-195.
- Lin, W., 2002. Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite. *Journal of geophysical research*. 107(B10): 1-16.
- Lin, W., y Takahashi, M., 2008. Anisotropy of strength and deformation of Inada granite under uniaxial tension. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27 (12): 2463-2472.
- Lindqvist, J.E., Åkesson, U., Malaga, K., 2007a. Microstructure and functional properties of rock materials - *Materials Characterization*, 58: 1183-1188.
- Lindqvist, J.E., Malaga, K., Middendorf, B., Savukoski, M. y Pétursson, P., 2007b. Frost resistance of natural stone, the importance of micro- and nano-porosity - publicada online: http://www.sgu.se/dokument/fou_extern/Lindqvist-et-al_2007.pdf
- Llorente, J.M., 2011. El valor indicador de los topónimos. El caso de la voz berrocal y sus variantes. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56: 59-77. I.S.S.N.: 0212-9426.
- López-Arce, P., Varas Muriel, M.J., Fernández-Revuelta, B. Álvarez de Buergo M., Fort, R., y Pérez-Soba, C., 2010. Durability of granites from the region around Madrid, Spain, exposed to the salt crystallization test: intra- and inter-granular surface roughness quantification. *Catena*, 83 (2-3): 170-185.
- López-Arce P., Fort, R., Gómez-Heras, M, Perez-Monserrat, E., y Varas, M.J., 2011. Preservation strategies for avoidance of salt crystallisation in El Paular Monastery cloister, Madrid, Spain *Environmental Earth Sciences*, 63: 1487-1509.
- López Sáez, J.A., Pérez Díaz, S., Núñez de la Fuente, S., Alba Sánchez, F., Serra González, C., Colmenarejo García, F., Gómez Osuna, R., y Sabariego Ruiz, S., 2015. Paisaje visigodo en la cuenca alta del Manzanares (Sierra de Guadarrama): análisis arqueopalinológico del yacimiento de Navalvillar (Colmenar Viejo, Madrid): *Arqueología y Prehistoria del Interior peninsular*, 2: 133-145.
- Lott, G., 2013. Sourcing stone for the conservation and repair of historical buildings in Britain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46 (4): 405-420.
- Loughlin, G.F., 1903. The building stones of Boston and vicinity. Tesis de doctorado, MIT (Boston, MA/USA), 109 pp.
- Madoz, P., (1846-1850) *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ultramar*.

- Manchao, H., Wen, N., Liqiang, H., y Lijing, L., 2010. Microcrack analysis of Sanya granite fragments from rockburst tests. *Min. Sci. Technol.* 20: 0238-0243.
- Marcos y Bausa, R., 1879. *Manual del albañil* Published by Tipografía editorial de G. Estrada., ISBN 10: 8497610571 / ISBN 13: 9788497610575.
- Margarot, M., 1780. *Histoire ou relation d'un voyage qui a duré près de cinq ans; pendant lequel l'auteur a parcouru une partie de l'Angleterre, la France, l'Espagne, ...* Par Mr. Maurice Margarot, le père.
- Marqués de la Ensenada, 1752, *Catastro del marqués de la Ensenada*: Gobierno de España, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Disponible en <http://pares.mcu.es/Catastro/>.
- Martín Donayre, F., 1879. *Descripción de la provincia de Ávila*. Comisión del Mapa Geológico de España. Imprenta y fundición de Manuel Manuel Tello, impresor de la cámara de S.M. Isabel la Católica, 23. Madrid. 297 pp.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., y García del Cura, M.A., 2006. La propagación de ultrasonidos en el estudio de materiales pétreos: Aplicación al estudio de las propiedades textoestructurales de las rocas y de su grado de alteración”. *Ingeniería del Terreno*. Ingeoter, 8. Ed. Carlos López Jimeno, 440 pp.
- Martínez Falero, J.E., *La industria de la piedra natural en la Comunidad de Madrid*. Consejería de Economía y Empleo de la Comunidad de Madrid.
- Matías, J.M.S., y Alves, C.A.S., 2002. The influence of petrographic, architectural and environmental factors in decay patterns and durability of granite stones in Braga monuments (NW Portugal).” *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Ed. Siegesmund S., Weiss T., Vollbrecht A., Geological Society, London, Special Publications, 205: 273-281.
- Mendiña, J., y Fort, R. (codirectores), 2005. *Las piedras utilizadas en la construcción de los bienes de interés cultural de la Comunidad de Madrid anteriores al siglo XIX*”, Instituto Geológico y Minero de España, 131 pp.
- Merrill, G. P., 1883. On the collection of Maine building stones in the United States National Museum: *Proceedings of the United States National Museum*, 6: 165-177.
- Merrill, G.P., 1891. *Stones for building and decoration*, 453 pp. New York, John Wiley and Sons.
- Merrill, G.P., 1897. *A treatise on rocks, rock-weathering and soils*. New York, Macmillan Co.; London, Macmillan & Co, 411 pp.
- Miglio, B., y Willmott, T., 1997. Durability of stone for construction - In: *International Conference on Building Envelope Systems and Technology* Eds.: Ledbetter S. and Harris R. published on line: http://www.bath.ac.uk/cwct/cladding_org/icbest97/paper31.pdf
- Mingarro, F., López de Azcona, M.C., y Fort, R., 2001. Alteración de materiales carbonáticos y graníticos en la fuente del Marqués de Pontejos (Madrid). *Restauración & Rehabilitación*, 1: 83-86.
- Miñano, S., 1829. *Diccionario geográfico- estadístico-histórico de España y Portugal*, Imprenta de Morno, plazuela del Cordón, n 1, Madrid.

- Morillas, H., Maguregui, M., Marcaida, I., Trebolazabala, J., Salcedo, I., Madariaga, J.M., 2015., Characterization of the main colonizer and biogenic pigments present in the red biofilm from La Galea Fortress sandstone by means of microscopic observations and Raman imaging *Microchemical Journal*, 121: 48-55.
- Moropoulou, A., Koui, M., Theoulakis, P., Bakolas, A., Roumpopoulos, K. y Michailidis., 2002. Microstructural criteria for the evaluation of stone susceptibility to sea-salt decay - In: *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of Mediterranean Cities* Eds.: Galán and Zezza, Swets and Zeitlinger, Lisse, 339- 345.
- Nasser, M.H.B., Schubnel, A., y Young, R.P., 2007. Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 44: 601-616.
- Navarrete Cáceres, C., 2000. *Palenque, 1784: el inicio de la aventura arqueológica maya*, 105 pp. Universidad Autónoma de México.
- Nicholson, D.T., 2002. Quantification of rock breakdown for experimental weathering studies - In: *Understanding and managing stone decay* Eds.: Přikryl, R. and Viles, H., Karolinum Press, 115-130.
- Niesel, K., 1981. Durability of porous building stone: importance of judgment criteria related to its structure, the *Conservation of Stone II*, International Symposium, Bologna, 1: 47-57.
- Nortes Nolasco, A., 2010. *El toro y el espacio vetón: el proceso de labra en granito de un "verraco" y su revisión deconstructiva*. Tesis de doctorado, universidad Complutense de Madrid.
- Nováková, L., Sosna, K., Brož, M., Najser, J., y Novák, P., 2011. Geomechanical parameters of the Podlesí granites and their relationship to seismic velocities. *Acta Geodyn. Geomater.*, 8: 3 (163), 353-369.
- Núñez de Toledo y Guzmán, H., 1555. *Refranes o proverbios en romance* (Salamanca,) Recopilación de 1508. Editor Blázquez. ISBN 8485944879, 9788485944873.
- Oliver Domingo, J.L., 1997. *Los diez libros de arquitectura*. Traducción de la obra original de Marco Vitruvio Polion. Ed. Alianza editorial. Madrid, 400 pp.
- Ordoñez, S., Fort, R., Garcia del Cura, M.A., 1997. Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 30: 221-230.
- Perez-Ema, N., Alvarez de Buergo, M., Bustamante, R., 2013. Effects of conservation interventions on the archaeological Roman site of Merida (Spain). *Advance of research. Procedia Chemistry*, 8:269-278.
- Perez-Monserrat, E.M., Alvarez de Buergo M., Gomez-Heras M., Varas Muriel, M.J., y Fort, R., 2013. An urban geomonumental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain: *Environ Earth Sci.*, 69: 1071-1084.
- Pérez-Ortiz, A., Ordaz, J., Esbert, R. M., Alonso, F. J., y Díaz Pache, F., 1996. Physical behavior and degradation trends in an anisotropic granite." 8th International Congress on deterioration and conservation stone, Berlin I: 305-309.

- Pires, V., Rosa L.G., y Dionísio, A., 2014. Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel-hole anchoring systems. *Construction and Building Materials*, 201 (64): 440-450.
- Ponz, A., 1781. *Viage de España, ó Cartas, en que se da noticia de las cosas más apreciables, y dignas de saberse que hay en ella*. Ed. Joachin Ibarra, Madrid 18 v. tomo X carta III: 57 pp.
- Příkryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variations in rocks. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 38: 671-82.
- Příkryl R, Lokajíček T, Li C, Rudajev, V., 2003. Acoustic emission characteristics and failure of uniaxially stressed granitic rocks: the effect of rock fabric. *Rock Mech Rock Eng.*, 36(4): 255-270.
- Rivas Brea, T., Prieto Lamas B. y Silva Hermo, B., 2008. Artificial weathering of granite *Materiales de Construcción*, 58: 179-189.
- Rivas, T., Pozo, S., Fiorucci, M.P., López, A.J., Ramil, A., 2012. Nd:YVO4 laser removal of graffiti from granite. Influence of paint and rock properties on cleaning efficacy. *Applied Surface Science*, 263: 563-572.
- Rivera, J., 1992. *De re aedificatoria* Leon Battista Alberti. Editorial Akal, 476 pp. ISBN: 978-84-7600-924-6.
- Rodríguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E., 2000. Influencing crystallization damage in porous materials through the use of surfactants: experimental results using sodium dodecyl sulfate and cetyltrimethylbenzylammonium chloride. *Langmuir*, 16: 947-954.
- Rodríguez-Navarro, C., Linares-Fernández, L., Doehne, E., Sebastian, E. (2002): Effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallization in porous stone. *J. Cryst. Growth.*, 243: 503-516.
- Røyne, A., Jamtveit, B., Mathiesen, J., y Mørth-Sørensen, A., 2008. Controls on rock weathering rates by reaction-induced hierarchical fracturing. *Earth and Planetary Science Letters*, 275: 364-369.
- Ruedrich, J., y Siegesmund, S., 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones *Environ. Geol.* 52: 225-49.
- Ruiz de Argandoña, V.G., Calleja, L., Rodríguez-Rey, A., Suarez del Río, L.M., y Celorio, C., 2009. X-ray computed tomography study of the influence of consolidants on the hydric properties of sandstones for stone conservation studies. *Engineering Geology*, 103 (3-4): 69-75.
- Sanjurjo, J., y Alves, C.A.S., 2006. Degradación de rocas graníticas empleadas como material de construcción en edificios históricos de A Coruña (NW España) *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña*, 31: 11-28. ISSN: 0213 – 4497.
- Schaffer, R.J., A.B.S.B., 1932. Weathering of natural building stones. Department of Scientific and Industrial Research. Building Research. Special Report. 18. x + 149. London: H.M. Stationery Office. 4s. 6d.
- Schiavon, N., Chiavari, G. Schiavon, G., y Fabbri, D., 1995. Nature and decay effects of urban soiling on granitic building stones. *The Science of the Total Environment*, 167: 87-101.

- Schiavon, N., 2000. Granitic building stone decay in an urban environment: a case of authigenic kaolinite formation by heterogeneous sulphur dioxide attack." 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, (Venice 19-24): 411- 421.
- Schiavon, N., 2002. Biodeterioration of calcareous and granitic building stones in urban environments." *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Ed. Siegesmund S., Weiss T., Vollbrecht A., Geological Society, London, Special Publications, 205: 195-205.
- Schön, J.H., 1996. *Physical properties of rocks Fundamentals and Principles of Petrophysics* Tarrytown (New York: Pergamon).
- Sequeira Braga, M.A., Paquet, H., y Begonha, A., 2002. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization. *Catena*, 49: 41-56.
- Serlio Boloñes, S., 1552. *Tercero y Cuarto Libro de Arquitectura de Sebastia Serlio Boloñes*. traducido de Toscano en Romance Castellano por Francisco de Villalpando Architecto. Toledo: Casa de Iván de Ayala, 1552. (Edición facs. Barcelona: Serie Arte y Arquitectura, Editorial Alta Fulla, 1990)
- Shadmon, A., 1989. *Stone, An introduction*. Intermediate Technology Publications Ltd. ISBN 0 946688 08 7 (UK) ISBN 0 942850 15 7 (USA), 140 pp.
- Shadmon, A., 1993. Dimension stone, its impact on environment and constructional applications. *The role of Engineering Geology*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 48: 119-122.
- Shuriye, A.O., y Danzomo, B.A., (Editores) 2011. *The Contribution of Al-Khazini in the Development of Hydrostatic Balance and its Functionality*, in *Contributions of Early Muslim Scientists to Engineering Sciences and Related Studies*, International Islamic University Malaysia (IIUM) Press. 170 pp.
- Siegesmund, S., Weiss T., y Vollbrecht A. (eds.), 2002. *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies - Geological Society Special Publication No. 25* Londodn, 448 pp.
- Siegesmund, S., y Török, A., 2011. Building stones. In: Siegesmund, S., Snethlage, R. (eds) *Stone in architecture—properties, durability*, 4º edit. Springer, Berlin, 11-96.
- Siegesmund, S., y Snethlage, R. (eds.), 2014. *Stone in Architecture*, 5º edit. 2014, XIII: 550 pp. DOI 10.1007/978-3-642-45155-3.
- Smith, B.J., Gomez-Heras, M., y McCabe, S., 2008. Understanding the decay of stone-built cultural heritage. *Progress in Physical Geography*, 32 (4): 439-61.
- Simão, J., Ruiz-Agudo, E., y Rodríguez-Navarro C., 2006. Effects of particulate matter from gasolina and diesel vehicle exhaust emission on silicate stone sulfation - *Atmospheric Environment*, 40: 6905-6917.
- Simón Díaz, J., 1952. *Historia del Colegio Imperial de Madrid*. Madrid, Instituto de Estudios Madrileños, 2 volumen.
- Sinha, S., Alsop G.I., y Biswal T.K., 2010. The evolution and significance of microfracturing within feldspars in low-grade granitic mylonites: A case study from the Eastern Ghats Mobile Belt, India. *Journal of Structural Geology*, 32: 1417-1429.

- Sobrino, M., 2002. La piedra como motivo para la arquitectura. Cuadernos del instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid. 32 pp.
- Sobrino, M., 2009. Catedrales. Las biografías desconocidas de los grandes templos de España. La esfera de los Libros. 833 pp.
- Sousa L.M.O, Suárez del Río L.M, Calleja, L., Ruiz de Argandoña, V.G., y Rodríguez Rey, A., 2005, Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites - Engineering Geology, 77: 153-168.
- Sousa, L.M.O., 2010. Evaluation of joints in granitic outcrops for dimension stone exploitation. Q J Eng Geol Environ, 42: 85-94.
- Sousa, L.M.O., y Gonçalves, B.M.M., 2012. Color assessment of granitic rocks and implications for their ornamental utilization. Color Res Appl., 37(5): 375-383.
- Sousa, L.M.O. 2013. The influence of the characteristics of quartz and mineral deterioration on the strength of granitic dimensional stones. Environ Earth Sci., 69 (4):1333-1346.
- Sousa, L.M.O., y Gonçalves, B.M.M. 2013. Differences in the quality of polishing between sound and weathered granites. Environ Earth Sci., 69 (4): 1347-1359.
- Sousa, L.M.O., 2014. Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: a comprehensive evaluation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73: 569-588.
- Swinburne, H., 1779. Travels trough Spain, in the Years 1775 and 1776 : in which several monuments of roman and moorish architecture are illustrated by accurate drawings taken on the spot. Ed. P. Elmsly, XV, 427 pp.
- Tabasso, M.L., y Simon, S., 2006. Testing methods and criteria for the selection/evaluation of products for the conservation of porous building materials - Reviews in Conservation, 7: 67-82.
- Taber, S., 1929. Frost heaving. Journal of Geology, 37: 428-461.
- Taber, S., 1930. The mechanics of frost heaving. Journal of Geology, 38: 303-317.
- Takarli, M., y Prince-Agbodjan, W., 2008a. Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage. Journal of ASTM international. 5 (3): 1-13.
- Takarli, M., Prince, W., y Siddique, R., 2008b. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze-thaw condition” International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45: 1164-1175.
- Takemura, T., Golshani, A., Oda, M., y Suzuk, K., 2003. Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40: 443-454.
- Tárraga Baldó, M.L., 2009. Mármoles y rocas ornamentales en la decoración del Palacio Real de Madrid Archivo Español de Arte, 82, (328): 367-392.
- Thuro, K., y Scholz, M., 2004. Deep weathering and alteration in granites-A product of coupled processes. 2004. GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C

Processes in Geosystems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications. Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, Suiza, 13-15 de Octubre, 2003.

- Townsend, J., 1791. A journey through Spain: in the years 1786 and 1787 and remarks in passing through a part of France ... ;en tres volumenos. - Londres : C. Dilly, -3 volúmenes.
- Török, A., y Rozgonyi, N., 2004. Morphology and mineralogy of weathering crusts on highly porous oolitic limestones, a case study from Budapest." *Environmental Geology*, 46: 333-349.
- Tuğrul, A., y Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Eng. Geol.* 51: 303-317.
- Turkington, A.V., 2002. Perception and prediction of stone durability - In: Annual Meeting of Decay and Conservation of Stone Buildings and Monuments, Denver Paper, 37-6.
- Twiss, R., 1775. Travels through Portugal and Spain, in 1772 and 1773 ... with copper-plates, and an appendix. - London: printed for the author and sold by G. Robinson, T. Recket, and J. Robson.
- UNE-EN 1925, 1999. Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 1936, 2007. Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 12371, 2011. Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 12407, 2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio Petrográfico. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 13755, 2008. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 14066, 2014. Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 14579, 2005. Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- UNE-EN 15886, 2011. Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies.
- Upadhyay, D., 2012. Alteration of plagioclase to nepheline in the Khariar alkaline complex, SE India: Constraints on metasomatic replacement reaction mechanisms. *Lithos*, 155: 19-29.

- Valverde, N., 2012. Un mundo de equilibrio: Jorge Juan, (1713-1773). Marcial Pons Historia, 277 pp.
- Vandevoorde, D., Pamplona, M., Schalm, O., Vanhellemont, Y., Cnudde, V., y Verhaeven, E., 2009. Contact sponge method: Performance of a promising tool for measuring the initial water absorption. *Journal of Cultural Heritage*, 10 (1): 41-47.
- Varas-Muriel, M.J., Fort, R., Martínez-Garrido, M.I., Zornoza-Indart, A, y López-Arce, P., 2014. Fluctuations in the indoor environment in Spanish rural churches and their effects on heritage conservation: hygro-thermal and CO2 conditions monitoring. *Building and Environment*, 82: 97-109.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.S.A., y Pamplona, J., 2007. Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt Hammer hardness. *Proc. 10th North American Masonary Conference*, St. Louis, Missouri, 980-991.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S., y Pamplona, J., 2009. Compressive Behavior of Granite: Experimental Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (9): 502-511.
- Vasconcelos, G., Alves, C.A.S., y Miranda, T., 2012. Nondestructive evaluation of granite building stones and relation with key mechanical parameters. *Harmonising Rock Engineering and the Environment*. 861- 866. Qian & Zhou (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-80444-8.
- Vázquez, P., 2010. Granitos ornamentales: caracterización, durabilidad y sugerencias de uso. Tesis Doctoral sin publicar. Universidad de Oviedo, 314 pp.
- Vázquez, P., Alonso, F.J. Esbert, R.M., y Ordaz, J., 2010. Ornamental granites: Relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network. *Construction and Building Materials*, 24: 2536-2541.
- Vázquez, P., Shushakova, V., y Gómez-Heras, M., 2015. Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: Experimental observations and stress simulation. *Engineering Geology*. 189: 58-67.
- Vazquez-Calvo, C, Alvarez de Buergo, M., Fort, R., y Varas-Muriel, M.J., 2012. The measurement of surface roughness to determine the suitability of different methods for stone cleaning. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(4), 108-117.
- Vázquez-Menéndez, P., Esbert, R.M., Alonso, F.J., y Ordaz, J., 2008. Evaluation of damage induced by salt crystallization in granitic building stones. 11th International congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torún. Eds. Jadwiga W. Lukaszewicz y Piotr Niemcewicz, I: 325-332.
- Veniale, F., Setti, M., y Lodola, S., 2008. Diagnóstico del deterioro de la piedra en el patrimonio construido. Datos y perspectivas” *Materiales de Construcción*, 58: 289-290.
- Viles, H.A., Camuffo, D., Fitz, S., Fitzner, B., Lindqvist, O. Livingston, R.A., Maravellaki, P.V., Sabbioni, C., y Warscheid, T., 1997. Group report: What is the state of our knowledge of the mechanisms of deterioration and how good are our estimates of rates of deterioration? In *Saving Our Architectural Heritage: The Conservation of Historic Stone Structures; Report of the Dahlem Workshop on Saving Our Architectural Heritage, The Conservation of Historic Stone Structures*, Berlin, March 3-8: 1996, ed. N. S. Baer and R.

Sneathlage, 95-112. Dahlem Workshop Reports. Chichester and New York: John Wiley & Sons.

- Villaseca, C., y Pérez Soba, C., 1989. Alkaline metasomatism in hercynian granitoids from the Sierra de Guadarrama (Spanish Central Range). Cuaderno Lab. Xeológico de Laxe, 14: 201-212.
- Villaseca, C., Andonaegui, P., y Barbero, L., 1993. Mapa Geológico del Plutonismo Hercínico de la Región Central Español (Sierra de Guadarrama y Montes de Toledo). (Escala 1:150.000. Servicio de Publicaciones del CSIC.
- Villaseca, C., Barbero, L., y Rogers, G., 1998. Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints: Lithos, 43: 55-79.
- Villaseca, C., y Herreros, V., 2000. A sustained felsic magmatic system: the Hercynian granitic batholith of the Spanish Central System: Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci., 91: 207-219.
- Villaseca, C., Bellido, F., Perez-Soba, C., y Billstrom, K., 2009. Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt: Mineralogy and Petrology, 96: 197-211.
- Villaseca, C., Orejana, D., y Belousova, E.A., 2012. Recycled metaigneous crustal sources for S- and I-type Variscan granitoids from the Spanish Central System batholith: Constraints from Hf isotope zircon composition: Lithos, 153: 84-93.
- Watson, P. 1990. La construcción de las catedrales medievales, Akal, Cambridge.
- Weiss, T., Siegesmund, S., y Rosolofosaon, P., 2000. The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint. 9º Congreso internacional de deterioro y conservación de rocas, Fassina V, (ed.), 1: 215-223.
- Wilson, M.J., 2004. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. Clay Minerals, 39: 233-266.
- Winkler, E.M., 1997. Stone in Architecture. Properties. Durability. Springer - Verlag, Wien, New York, 313 pp.
- Wong, R.H.C., Lin, P., y Tang, C.A., 2006. Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression. Mech. Mater. 38: 142-159.
- Yilmaz Günes, N., Goktan R.M., y Kibici, Y., 2011. Relations between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48: 506-513.
- Young, A., 1860. Voyages en Italie et en Espagne, pendant les années 1789 et 1789 / traduction de M. Lesage. - Paris : Guillaumin et Cie., (Impie. Noblet).
- Yu, S., y Oguchi, C.T., 2010. Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones. Eng. Geol., 115: 226-236.

- Ziegler, M., Loew, S., y Moore, J.R., 2013. Distribution and inferred age of exfoliation joints in the Aar Granite of the central Swiss Alps and relationship to Quaternary landscape evolution. *Geomorphology*, 201:344-362.
- Ziegler, M, Loew, S., y Bahat, D., 2014. Growth of exfoliation joints and near-surface stress orientations inferred from fractographic markings observed in the upper Aar valley (Swiss Alps). *Tectonophysics*, 626: 1-20.
- Zhou, H. W., Xie, H., 2004, Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis, *Physics Letters A*, 325: 355-362.

ANEXOS

En este apartado de anexos se transcriben una serie de documentos históricos en donde se habla de la piedra berroqueña, así como algunos artículos periodísticos y partes de libro más recientes.

ANEXO I.

Catastro Marqués de la Ensenada de varios lugares de las cercanías de Madrid en el que se citan actividades relacionadas con la producción de granito

El catastro del Marqués de la Ensenada constaba de 40 preguntas que desde 1749 se enviaron a los 15000 lugares de la Corona de Castilla al objeto de conocer la riqueza del reino para establecer un nuevo sistema impositivo. Se transcribe la totalidad de las preguntas enviadas y a continuación las respuestas de los pueblos productores del granito objeto de esta tesis y que tienen relación con la producción del mismo.

“Interrogatorio que han de satisfacer, bajo juramento, las justicias, y demás personas, que harán comparecer los intendentes en cada pueblo

1. *Cómo se llama la población*
2. *Si es de realengo o de señorío, a quién pertenece, qué derechos percibe y cuánto produce.*
3. *Qué territorio ocupa el término, cuánto de levante a poniente y del norte al sur, y cuánto de circunferencia, por horas, y leguas, qué linderos o confrontaciones; y qué figura tiene, poniéndola al margen.*
4. *Qué especies de tierra se hallan en el término; si de regadío y de secano, distinguiendo si son de hortaliza, sembradura, viñas, pastos, bosques, matorrales, montes, y demás que pudiere haber, explicando si hay algunas que produzcan mas de una cosecha al año, las que fructificaren sola una y las que necesitan de un año de intermedio de descanso.*
5. *De cuántas calidades de tierra hay en cada una de las especies que hayan declarado, si de buena, mediana e inferior.*
6. *Si hay alguno plantío de árboles en las tierras que han declarado, como frutales, moreras, olivos, higueras, almendros, parras, algarrobos, etc.*
7. *En cuáles de las tierras están plantados los árboles que declararen.*
8. *En qué conformidad están hechos los plantíos, si extendidos en toda la tierra o a las márgenes, en una, dos, tres hileras, o en la forma que estuvieren*
9. *De qué medidas de tierra se usa en aquel pueblo: de cuántos pasos o varas castellanas en cuadro se compone, qué cantidad de cada especie de granos de los que se cogen en el término se siembra en cada una.*
10. *Qué número de medidas de tierra habrá en el término, distinguiendo las de cada especie y calidad, por ejemplo, tantas fanegas, o del nombre, que tuviese la medida de tierra de sembradura de la mejor calidad, tantas de mediana bondad y tantas de inferior; y lo propio en las demás especies que hubieren declarado.*
11. *Qué especies de frutos se cogen en el término*
12. *Qué cantidad de frutos de cada género, unos años con otros, produce, con una ordinaria cultura, una medida de tierra de cada especie y calidad de las que hubiere en el término, sin comprender el producto de los árboles que hubiese.*
13. *Qué producto se regula darán por medida de tierra los árboles que hubiere, según la forma en que estuviese hecho el plantío, cada uno en su especie.*
14. *Qué valor tienen ordinariamente un año con otro los frutos que producen las tierras del término, cada calidad de ellos.*
15. *Qué derechos se hallan impuestos sobre las tierras del término, como diezmo, primicia, tercio-diezmo u otros; y a quién pertenecen.*

16. A qué cantidad de frutos suelen montar los referidos derechos de cada especie o a que precio suelen arrendarse un año con otro.

17. Si hay algunas minas, salina, molinos harineros u de papel, batanes u otros artefactos en el término, distinguiendo de qué metales y de qué uso, explicando sus dueños y lo que se regula produce cada uno de utilidad al año.

18. Si hay algún esquileo en el término, a quién pertenece, qué número de ganado viene al esquileo a él y que utilidad se regula da a su dueño cada año.

19. Si hay colmenas en el término, cuántas y a quién pertenecen.

20. De qué especies de ganado hay en el pueblo y término, excluyendo las mulas de coche y caballos de regalo; y si algún vecino tiene cabaña o yeguada que pasta fuera del término, donde y de qué número de cabezas, explicando el nombre del dueño.

21. De qué número de vecinos se compone la población y cuántos en la casas de campo o alquerías.

22. Cuántas casas habrá en el pueblo, qué número de inhabitables, cuántas arruinadas; y si es de señorío, explicar si tienen cada una alguna carga que pague al dueño por el establecimiento del suelo, y cuánto.

23. Qué propios tiene el común y a que asciende su producto al año, de que se deberá pedir justificación.

24. Si el común disfruta algún arbitrio, sisa u otra cosa, de que se deberá pedir la concesión, quedándose con copia que acompañe estas diligencias; qué cantidad produce cada uno al año, a que fin se concedió, sobre qué especies para conocer si es temporal o perpetuo y si su producto cubre o excede de su aplicación.

25. Que gastos debe satisfacer el común, como salario de Justicia y regidores, fiestas de Corpus u otras; empedrado, fuentes, sirvientes, etc., de que se deberá pedir individual razón.

26. Que cargos de Justicia tiene el común, como censos, que responda u otros, su importe, por qué motivo y a quien, de que se deberá pedir puntual noticia.

27. Si está cargado de servicio ordinario y extraordinario u otros, de que igualmente se debe pedir individual razón.

28. Si hay algún empleo, alcabala u otras rentas enajenadas, a quién, si fue por servicio pecuniario u otro motivo, de cuánto fue y lo que produce cada uno al año, de que se deberán pedir los títulos y quedarse con copia.

29. Cuántas tabernas, mesones, tiendas, panaderías, carnicerías, puentes, barcas sobre ríos, mercados, ferias, etc. hay en la población.

30. Si hay hospitales, de qué calidad, qué renta tienen y de qué se mantienen.

31. Si hay algún cambista, mercader de por mayor o quien beneficie su caudal por mano de corredor u otra persona, con lucro e interés; y qué utilidad se considera el puede resultar a cada uno al año.

32. Si en el pueblo hay algún tendero de paños, ropas de oro, plata y seda, lienzo, especería u otras mercaderías, médicos, cirujanos, boticarios, escribanos, arrieros, etc. y qué ganancia se regula puede tener cada uno al año.

33. Qué ocupaciones de artes mecánicas hay en el pueblo, con distinción, como albañiles, canteros, albéitares, herreros, sogueros, zapateros, sastres, pelaires, tejedores, sombrereros, manguiteros y guanteros, etc.; explicando en cada oficio de los que hubiere, el número que haya de maestros oficiales y aprendices, y qué utilidad le puede resultar, trabajando meramente de su oficio, al día cada uno.

34. Si hay entre los artistas alguno, que teniendo caudal, haga prevención de materiales correspondientes a su propio oficio o a otros, para vender a los demás, o hiciere algún otro comercio, o entrase en arrendamientos; explicar quienes, y la utilidad que consideren le puede quedar al año a cada uno de los que hubiese.

35. *Qué número de jornaleros habrá en el pueblo y a cómo se paga el jornal diario a cada uno.*

36. *Cuántos pobres de solemnidad habrá en la población.*

37. *Si hay algunos individuos que tengan embarcaciones, que naveguen en la mar o ríos, su porta, o para pescar; cuántas, a quien pertenecen y que utilidad se considera da cada una a su dueño al año.*

38. *Cuántos clérigos hay en el pueblo.*

39. *Si hay algunos conventos, de qué religiones y sexo, y qué número de cada uno.*

40. *Si el rey tiene en el término o pueblo alguna finca o renta, que no corresponda a las generales ni a las provinciales, que deben extinguirse; cuáles son, cómo se administran y cuánto producen”.*

ANEXO I. a.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Collado Villalba Alpedrete

Respuesta a la pregunta 21: [f. 341] “*Que en este barrio de Villalba ay sesenta y dos vezinos en su poblazón, dos en las bentas de Martín, que distan de ella como un quarto de legua, inclusos pobres, jornaleros y todos los cavezas de casa, útiles y ynútiles, y además un presvítero y siete [v] viudas, moradores todos en dha poblaziñon y bentas. [...].*

Y la de Alpedrete se compone de quarenta y zinco vezinos, incluso los jornaleros, pobres, y todos los cavezas de casa, útiles y inutiles, y además un presvítero y zinco viudas, moradores todos en dha poblazón”.

Respuesta a la pregunta 33: [f. 352] “*Que en este barrio de Collado Villalba hay [...] cinco canteros, que ganan al día seis rreales cada uno; [...] y en el de Alpedrete, hay [...] [v] [...] treze canteros qeu los maestros ganan al día ocho reales y los offiziales a quatro”.*

Respuesta a la pregunta 37: [f. 353] “*Que en esta villa y barrios, aunque no ay individuo alguno de los que la pregunta expresa, todos los labradores y demás individuos que tiene carretas, por tiempo de los ocho meses mayores conducen y portean a la villa y corte de Madrid leña, jara, carbón y piedra con ellas, ha[v]ziendo un viage cada semana; y considerando ganar treinta reales cada una en cada viage, haviendo en el de Collado Villalba zinquenta carreta, hascienden sus portes a quarenta y ocho mill reales cada año; y en el de Alpedrete, veinte y seis, ascienden también a veinte y quatro mill novezientos y sesenta reales cada año”.*

ANEXO I. b.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Cadalso de los Vidrios

Esta villa en el siglo XVII se dedicaba a la producción de Vidrio, por lo que los vecinos se dedicaban a las tareas vinculadas con la producción, transporte y comercialización del mismo, no habiendo constancia en el Catastro del Marqués de la Ensenada de labores de cantería.

ANEXO I. c.

Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Moral Zarzal

Respuesta a la pregunta 32: [f. 186r] *“A la treinta y dos dijeron que en esta villa ai un scrivano [...]; un sachristán [...]; un tabernero [...]; un tendero de abacería [...]; un maestro de niños; [...] un obligado de carnes [...]; [f. 185v] que habrá en este pueblo como sesenta carretas, que estas son de los que se dizen labradores, que con el motibo de las cortas labores las emplean en conduzir piedra o carbón a la corte, en que les pareze se emplearán los seis meses del año; y que en cada dos meses harán cinco viajes, que hazen quinze; y cada uno dejará de ultidad cinquenta y seis reales vellón, respecto de que lo demás del tiempo lo emplea en sus cortas labores y recolección de sus frutos de pan y de yerba, y muchos días que no trabajan por continuazió de niebes y llubia”.*

Respuesta a la pregunta 33: *“A la treinta y tres dijeron que de lo contenido en ella ai en este pueblo [...] como tres o quatro canteros, y cada uno gana de jornal cinco reales, y se les debe bajar dos meses, por feriados; [...] que ai un maestro de carretajes que le regulan de jornal siete reales rebajando dos meses por feriados”.*

ANEXO I. d. Respuestas al interrogatorio del Catastro Marqués de la Ensenada de la villa de Zarzalejos:

Pregunta 32: [f. 601] *“[...] Asimismo hay cinquenta y seis labradores y vecinos, que desspuées de sus labranzas andan a portes de carbón, madera y piedra a Madrid, unos por sí y otros por sus criados; y regulan a los veinte y cinco y a cada uno de por sí, por ser de ygual trajín, un mill y [v] doscientos reales vellón, por doce viages de a dos carretas, a razón cada carro de cinquenta; y a los treinta y uno restantes, por ser de menos trajino, a causa de portear con una sola carreta, consideran seiscientos reales a cada uno, al mismo resspecto que los antecedentes”.*

ANEXO II.

Se cita la producción de granito en Colmenar Viejo.

Diccionario geográfico de Miñano y Madoz, 1826-1829:

Colmenar Viejo: " Hay en su término muchas canteras de piedra berroqueña y caliza que es la cal compacta; también hay alguna que otra mina de plomo y tungsteno, y muchos montes y collados de pasto. También se cree que hay en él muchas minas de oro, plata y cobre".

ANEXO III

Archivo de la Villa Conde Duque (Madrid)

Doc. 1-2-24. Fechado en Madrid, 17 noviembre 1612.

Regesto: "Auto del Consejo de S. Magestad para que los dueños de las casas pagasen las losas de sus aceras; correspondiendo el arroyo y el centro de las plazas a la villa".

[r] "Los señores del Consejo de Su Magestad, abiendo visto lo pedido por esta villa de Madrid sobre lo tocante al empedrado de ella:

Mandaron que las dos haceras de las calles que se empedraren, paguen los dueños de las casas cuyas delanteras se empedraren, pagando cada uno lo que le tocare, conforme a la pertenencia de la casa que se empedrare,; y lo de en medio de las calles y todas la plaças, [lo] pague este villa de Madrid de las sisas, como estaba mandado, sin concursso; con que en lo que toca a las plaças, se entienda las calles que tubieren más de sesenta pies de ancho y los veynte pies de ancho de cada hacera de las dhas. plaças, paguen los dueños de las casas, y lo de en más de en medio, la villa; y todo lo tocante a los dhos. empedradrados se cometa Antonio Rici, visitador de la limpieça de esta corte; y por su certificación se despachen todos los mandamientos, repartimientos y libranças que fueren necessarias para la cobrança de los dhos. empedrados; y las dudas que se ofrecieren sobre lo contenido en este auto se remitan al señor don Diego López de Ayala, que las determine; y así lo mandaron".

Doc. 1-16-24. Fechado en Madrid, 7 agosto 1730.

Regesto: "Ynfome del visitador D. Juan de Silva y Quiñones, [...] sobre el auto el enlosado de las calles".

[r] "Sr. don Vicente Coronel:

Haviendo hecho reflexión del encargo que V. M. me hizo ayer en punto del inzidente de losas, diré:

Que en el año de 5, el señor marqués de Fuente Pelayo, corregidor que fue de Madrid, intentó poder losas en las orillas de las calles más públicas, y para facilitararlo se hizo consulta al Consejo; no puedo asegurar si fue hecha por Madrid o por dho.

señor marqués; lo que he podido hacer memoria es que se dibatió [v] muchos dias la resolución del Consejo, por incomvinientes que se le ofrecía para su execusión y modo de satisfacer su costo; por que acudió el señor marqués al rey, y mandó al governador del Consejo se resolviese la pretensión del correxidor; como en efeto se hizo así, en la que se mandava se hiciese enlosado en las calles que pareciese convenientes, a costa de los dueños de las casas, con distinción de que solo havían de pagar lo que cojía la línea de su casa; y que los huecos y traviesas havían de ser de quenta [r] de su líquido coste, sin dejarle advitrio al cantero de poder llevar más a unos que a otros, arreglándose al zitado ajuste.

Y por lo que mira al empedrado que era necesario levantar para sentar las losas, y sentadas guarnezer la orilla, se hizo cargo al empedrador del quartel lo executase; y en remuneracion de este trabajo se llevase la piedra que se arrancó y ocupan las losas; como todo se executó en la forma que oy se mantiene.

El motivo que hubo para no prosiguir in continente fue que [en] el voquete de las dos [v] entradas de las callejuelas que salen a San Miguel, aquel invierno inmediato se desgraciaron tres o quatro mulas de coche; y asimismo se maltrató un cavallero que atravesava desde la Platería por una de ellas a San Miguel, haviéndosele resbalado los pies al cavallo en las losas que pusieron; por cuia causa se reconoció no se podía executar esta providencia en calle que no fuese capaz para los coches por el pisso de las mulas, el que es preciso sea sobre empedrado.

[v] Pero estaba el señor marqués en el ánimo de proseguir su obra por los cubiertos de los portales de la Calle Mayor, los de Santa Cruz y Plaza, en la forma que está el portal de los Paños que llaman de Belem; pero con el contratiempo que sobrevino el año de 6 de la imbasión de las tropas enemigas no se prefecionó obra tan importante a el bien común.

Siendo quanto puedo decir a V. M. en este asunto, estando zierto que quanto mi inutilidad pueda servir a Madrid [v] y a la Junta, me tendrá a sus pies en el más profundo respecpto” Firma: Juan de Silva y Quiñones.

ANEXO IV

Transcripción del documento completo conocido como “Instrucción de Sabatini”.
(1761)

"INSTRUCCIÓN para el nuevo Empedrado, y Limpieza de las Calles de Madrid, en que se contiene substancialmente el Proyecto de Don Francisco Sabatini: aprobado uno, y otro por S. M. (que Dios guarde) por su Real Orden de catorce de Mayo de mil setecientos sesenta y uno, que va á su continuación

PRIMERAMENTE todos los dueños de casas ,no solamente los que las construyan dé nuevo, o reedifiquen (como estaba mandado) sino de las antiguas, y aunque no tengan necesidad de repararse, embaldosen el frente, y costados de ellas, que caen a las Calles publicas, con Baldosas de piedra berroqueña de tres pies en quadro, con la entrada, y asiento correspondiente en la tierra para su firmeza, y con una muesca en cada costado, y agujero én medio para levantarlas con facilidad, con alguna palanca, barreta, siempre que sea necesario para componer los Encañados, o para otro fin.

II. Que las Comunidades Religiosas, Iglesias, Parroquias, y Ermitas ejecuten lo mismo de cuenta de sus Rentas, o Fabricas, en todo el ámbito de sus Conventos, é Iglesias comprendidas en esta regla, las Comunidades de Franciscos Observantes, Descalzos, y Capuchinos, que no tienen Rentas, y lo deberán hacer (como las demás obras de sus Iglesias, y Conventos) de las Limosnas que recogiesen, y solo quedaran exceptuados los Padres de San Cayetano, los Conventos de Monjas, y sus iglesias, y los Hospitales públicos, Casas de Inclusa, Niños y Niñas, en que se deberá ejecutar esta obra de cuenta del Públicos a excepción de que si dichos Hospitales, Conventos tuviessen en sus inmediaciones casas de sus Administradores ú otras Personas Seculares y deberán embaldosar sus frentes y costados á su costa y con mas razon las casas que tengan en propiedad para alquilar á otros Inquilinos y si sobre este assunto se ofreciere alguna duda, se acudirá por declaración al Gobernador del Consejo, o Ministros que este nombrare para este encargo lo cual se ha de ejecutar por todos los Particulares, Dueños de casas, Prelados y Comunidades dentro de dos años y si alguno estuviere moroso, especialmente en sus calles principales y publicas se ejecutará por cuenta del Publico y embargando sus Alquileres, y á las Comunidades reteniendo las Relaciones que les correspondan y halla reintegrarse, y S. M. dando ejemplo á todos ejecutará lo mismo en las fachadas de la calle del Thesoro y Real Biblioteca, y lo mismo se executará en los Edificios públicos y como Cárceles de Corte y Villa cada uno á costa de sus fondos.

III. Que los Dueños de Casas y lo mismo las referidas Comunidades en sus Conventos, en las que posean para alquilar y especialmente en las que tengan Quarto principal sobre el bajo pongan en todos sus tejados exteriores Canalones de hoja de lata o plomo, en los que no los tuvieren con sus desagues correspondientes al ancho de cada calle y no haciéndolo, se ejecutará á su costa, haciendo embargos en la forma dicha.

IV. Los mismos Dueños de Casas han de hacer en todas ellas, á su costa, un Conducto para las Aguas de cocina y otras menores de limpieza, y asseo de ellas, el cual recibirá las de todos los Quartos, embebido, o contiguo (si puede ser) á sus paredes interiores, para que en las exteriores no aparezca deformidad, los cuales Conductos han de ser de Arcaduces de competente anchura, vidriados por dentro, y han de tener en cada Alto, Quarto un Conducto de ellos, en forma de Y griega, y otro en

figura de embudo, para el desagüe de cada Quarto, (como se explicará en Diseño que se hará de ello) con su sumidero, o Pozo, adonde se consuman dichas Aguas; y si no hubiere esta disposición, ni la de encaminarlas á Conductos públicos, se han de conducir, cubiertas dichas Aguas, por los Patios, Portales á las calles, adonde mas les acomoden, de modo, que salgan por la superficie de ellas, con un principio de vertiente á la salida solamente, dispuesto de forma, que ni estorve el tránsito de la gente de a pie, que camina arrimada á las paredes de las casas, ni que con Arroyos, o Canales haga perjudicial, y embarazoso el tránsito de los Coches; y en el embudo, que sirva de vertedero en cada Alto, o Quarto, se pondrá rallo, para que por ese conducto solo parte el Agua líquida, sin otras materias.

V. Que igualmente en todas las Casas se harán por los Dueños de ellas, y á sin costa, otros Conductos para las Aguas mayores, o inmundicia principal, que han de terminar en Pozos de la profundidad competente, para que puedan limpiarse á sus tiempos, y con sus bocas para este fin, que se han de cubrir con losas de piedra berroqueña, de vara, ó de quatro pies en quadro, y su agujero en medio para levantarlas con barra fácilmente, á excepción de las calles próximas á las Minas que están corrientes, en las que se dará curso á dicha inmundicia por las referidas Mina; y los dichos Conductos se incluirán en el grueso de las paredes y se harán de Caños de barro, bien vidriados por dentro, y de catorce dedos de diámetro, concavidad, uno de grueso, y dos pies de alto, y machiembrados, que serán de la Fabrica de Alcalá, ú otra mas aparente, poniendo para Vaciadero en cada Quarto, o Alto, un caño de la misma materia, en figura de embudo, y sin rallo, que entre en el primer caño, y dejando un nicho correspondiente con su ventana de solapo, para abrirlo, y cerrarlo y en cada alto de las Casas, Quarto, o Piso de cada casa, se pondrá otro Caño de la misma materia, con la figura de una Y griega, para que por un ramo, y embocadura de esta Y griega, entre el otro en figura de embudo, que ha de servir de Vaciadero en cada Quarto; y por el otro ramo de dicha Y griega continúe el Conducto arriba á los demás Quartos, que en cada uno se repetirán dicha Y griega, y embudo para Vaciadero, y continuará en ella forma hacia arriba el Conducto con Caños ordinarios (con lo que ocuparán muy cortó sitio en cada casa) hasta dar ventilación por el tejado, como chimenea, y por abaxo hasta la Mina, o Pozo, que haya de servir de Deposito de dicha inmundicia, para limpiarla á sus tiempos, interin no puedan hacerse las Minas, y Conductos de que trato Don Joseph Alonso de Arce, Arquitecto, é Ingeniero que fue de esta Corte i advirtiendo, que en los casos particulares se acomodaran los reparos necesarios, según las Instrucciones, que se darán a cada Arquitecto por Don Francisco Sabarini, Maestro de las Reales Obras, y principal Director que ha de ser de estas, en las que no se permitirá diferencia ni alteración, que pueda ser en perjuicio de ellas; pero se admitirá cualquiera discusión, o primor particular, que las mejore, con la aprobación de dicho Arquitecto Director ; y conforme se vayan haciendo en cada casa estos Conductos, se irán quitando en ellas los Canales de madera que hasta ahora se ha usado, y se prohibirá el verter cosa alguna por sus ventanas aun a las horas, que hasta aquí se ha permitido.

VI. Las obras de dicho Conducto para la inmundicia principal, las del otro Conducto para las Aguas de cocina, y limpieza de las Casas, las de Basureros en sus Patios, Cavallerizas, o Portales, y las de los Canales en los tejados, en donde no los hubiesse, y las del Embaldosado de una vara en las Calles, arrimada a las fachadas, o cortados de cada casa, se han de ejecutar, como va dicho, a costa de los Dueños de dichas Casas, por los Maestros, Arquitectos, que eligieren, dandose licencia, y facultad a dichos Dueños para que puedan cargar sobre los Alquileres, aunque sea a los

Inquilinos antiguos, un cinco por ciento, del capital que importaren dichas obras, repartido dicho cinco por ciento rata por cantidad en los Alquileres de cada Quarto, en que no se permitirá exceso, ni fraude alguno; y dicho prorrateo se hará igualmente en los Quartos que vivieren los Dueños de las mismas Casas, cómo si estuvieran alquilados; y con dicho aumento pueden muy bien atender á los reparos, que se les ocasionen por estas nuevas obras, y sacar un rédito correspondiente al capital, que desembolsen para ellas.

VII. La broza de escobas, esteras, mondas de cocina, ceniza, cisco del carbón, cacharros, y toda aquella basura, que en una casa particular se origina de su servidumbre, en que se incluirán tambien los despojos de cualquier Oficio particular, como de Tejedor, Sastre, Zapatero, ú otros, y de las Tiendas de todo aquello, que no es liquido, se depositarán en los Portales, Patios, Cavallerizas, ú otros parajes, que se destinaren en cada casa, o calle, para que con Cavallerias, y Serones destinados á este fin, que es lo mas cómodo para poder entrar á cargar en qualquier Portal, o Patio, se saquen a costa del Publico fuera de Madrid, para que en las calles no haya basura alguna de esta clase.

VIII. Lo mismo se executara en la Plaza Mayor, y Plazuelas, limpiándolas todos los dias del residuo de las Verduras, y demás cosas, que en ellas se venden, y del estiercol de Cavallerias de los Vendedores, todo á costa del Publico, como también la limpia, y saca de la inmundicia principal, a sus tiempos, de los Pozos, o Depósitos de ella en cada casa, para lo qual servirá el estiercol, o ceniza de las mismas Casas de las inmediatas, con que ha de sacarse rehuelta, y cubierta la inmundicia de dichos Depositos; pero el estiercol, o burrajo, ceniza, y demás basura, que producen las Tahonas, y Panaderías y el cisco, o tierra de los Almacenes, y Puestos de Carbón de otros Almacenes públicos, y particulares, ha de ser de cuenta de los particulares Inquilinos, o de los Dueños, y personas que cuiden de dichos Almacenes, el sacarlo á su costa al campo para que nada se detenga en las calles ; y en quanto á los despojos de las Obras, en que se han de incluir los de los retejos, han de cuidar los Maestros, o Dueños de ellas, de que se limpien todos los Sábados, como está mandado por las Ordenanzas de Madrid.

IX. El Empedrado de las Calles, a excepciori de la vara o tres pies arrimados á las Casas, (que como queda dicho ha de sér de cuenta de los Dueños de ellas) se ha de hacer á costa de el Publico; y para que sea durable, y cómodo, se ha de hacer de baldósas de un pie enquadro rayadas, también quadros pequeños para la comodidad de los Coches y Gente de á pie en la forma que están las del Patio, Portico, y entrada del Palacio Nuevo, con el grueso correspondiente, para poderse sentar con firmeza, y picarse de nuevo en caso de gastarse, y han de rematar por la parte inferior en punta, ;para que entren bien en la tierra, y arena, con que se han de sentar, y en donde convenga con cal, y arena, y cada baldosa ha de tener quatro muescas, o medias cañas en sus quatro costados, á fin de que puedan levantarse con facilidad, y sin quebrarse, con qualquiera palanca, para componer las Cañerías, o echar alguna nueva en lugar de las que se quiebren, o desgasten, las cuales baldosas han de ser de piedra berroqueña, granimenuda, la mas sólida y firme que se encontrare sin que se admita en los ajustes que se hiciesen, ninguna baldosa de mala calidad, y estas se han de sentar con el declivio que oy tienen las mismas calles desde cada cera a sus arroyos respectivos, y los arroyos a sus corrientes y mejorando el piso y cuestas de las calles, y igualándolas en quanto sea posible.

X. Los Arroyos se han de señalar con baldosas de la misma piedra y calidad rayadas igualmente como las demás baldosas; pero estas de los arroyos, no han de

tener de ancho mas que un pie, y dos de largo, sin que en dichos arroyos se permita borde alguno, que haga desigual dicho embaldosado, (como lo han acostumbrado hasta aqui los Empedrados) pues solamente se han de distinguir dichos arroyos en el tamaño de las baldosas, y en el declivio correspondiente en el embaldosado, desde cada cera a dicho arroyo.

XI. Tampoco se han de permitir Arroyos que atraviesen el Embaldosado, desde las Casas particulares por conductos superficiales, hasta el arroyo principal sino los que sean inescusables para la salida de las Aguas interiores, llovedizas, o otras de dichas Casas, los que deben derramarse rectos y de plano sin señal de arroyo porque no ha de quedar mas que el de en medio de la calle, a excepción de los que de otras calles, o callejuelas atraviesan a las principales, los quales han de venir también rectos al arroyo de la calle principal, sin buscar (como hasta aqui han acostumbrado los Empedrados) la corriente, sacandolos obliquos azia esta, y haciendo difícil, y penoso el transito de los Coches.

XII. Para demostración de dicho Embaldosado, su coste, y duración, se hará Plan, y por ahora la experiencia en la Carrera de San Gerónimo, desde la frente de la Iglesia de los Italianos, hasta la esquina del Buen Suceso, y su frente, y ha de correr al cargo, y cuidado de dicho Don Francisco Sabatini y su coste (a excepción de las fronteras de las Casas) de cuenta del Publico, pero si pareciere, que el tramo que hay desde los Italianos hasta el Buen-Suceso, se divida en dos, uno desde dicha Iglesia de los Italianos hasta las Quatro Calles, y otro desde alli al Buen-Suceso, y que una mitad se haga de dichas baldosas de piedra berroqueña, y la otra mitad de pedernal, para experimentar el mayor coste, que podrá tener de un modo, y de otro, la mayor comodidad que se reconozca en cada mitad y su duración, podrá darse principio en esta forma, para la experiencia que se desea; y para continuar esta Obra de Embaldosado, como lo mas importante para la limpieza, y comodidad de las calles, que es la única que ha de costear el Publico, se destinarán los fondos correspondientes, como también para los gastos anuales de la limpieza precisa de las calles, y de los Basureros, y Pozos de la inmundicia, quedando al cargo de los Dueños de Casas el mantener las Obras interiores de sus Casas, y los Embaldosados de sus fronteras.

XIII Y últimamente, considerandose muy conveniente para la subsistencia del nuevo Empedrado, la puntual observancia de los Autos acordados en la parte que previenen, bajo de graves penas, que no se permitan Cerdos por las calles de Madrid, se prohíbe este desorden desde principio del año próximo venidero, sin embargo de qualquiera Privilegio, que pretendan tener los Religiosos de San Antonio Abad, pero á estos se les recompensará, con que de cuenta del caudal de Causa publica se satisfará el gasto que ocasione la guarda, que sea necessaria para sacarlos al campo, como está mandado por lo respectivo á los demás Vecinos, que tengan Ganado de esta especie, que deben sacarlo de Madrid antes de salir el Sol, y no entrarlo hasta despues de que se haya puesto, recogéndolo en Casa, o Corral correspondiente, de modo que no pueda andar por las calles de dia, ni de noche y sino para entrar, y salir á las horas dichas, =Está rubricada del Ilustrisimo Señor Obispo de Cartagena, Governador del Consejo.

El Rey aprueba esta Instrucción. Aranjuez catorce de Mayo de mil setecientos sesenta y uno. = El Marqués de Squilace.

Illust^{mo} Señor. = El Rey ha visto, y se ha enterado con particular atención del Proyecto que formo el Ingeniero D. Francisco Sabatini, para la Limpieza, y Empedrado de Madrid, y las Instrucciones, que para su ejecucion ha dispuesto V. S. I. y puso en sus Reales manos, con Representacion de nueve del corriente; uno, y otro ha sido de la

aceptación de S.M: y haviendolo aprobado, manda, que desde luego se ponga en practica dando V. S. I. las ordenes, y haciendo publicar los Vandos, y demás providencias, que juzgare convenientes, para que los Dueños de las Casas executen las Obras que les corresponden, manejandose en el modo, y forma que previene la Instruccion, de cuya observancia quiere S. M. se encargue V. S. I. valiendose de los Alcaldes que necessite, y previniendolo al Consejo, para su inteligencia. A este fin lo participo á V. S. I. de su Real orden, debolviendole las expressadas Instrucciones, y Proyecto. Dios guarde a V. S. I. muchos años. Aranjuez catorce de Mayo de mil setecientos sesenta y uno. = El Marqués de Squilace.= Señor Obispo Governador del Consejo".

ANEXO V

Varios documentos relacionados con los materiales de construcción de la fuente de la Cibeles.

ANEXO Va. Transcripción de un párrafo en donde se habla de la piedra de Redueña.

Ponz, A. 1781, Viaje de España, tomo X, carta III; pág. 57

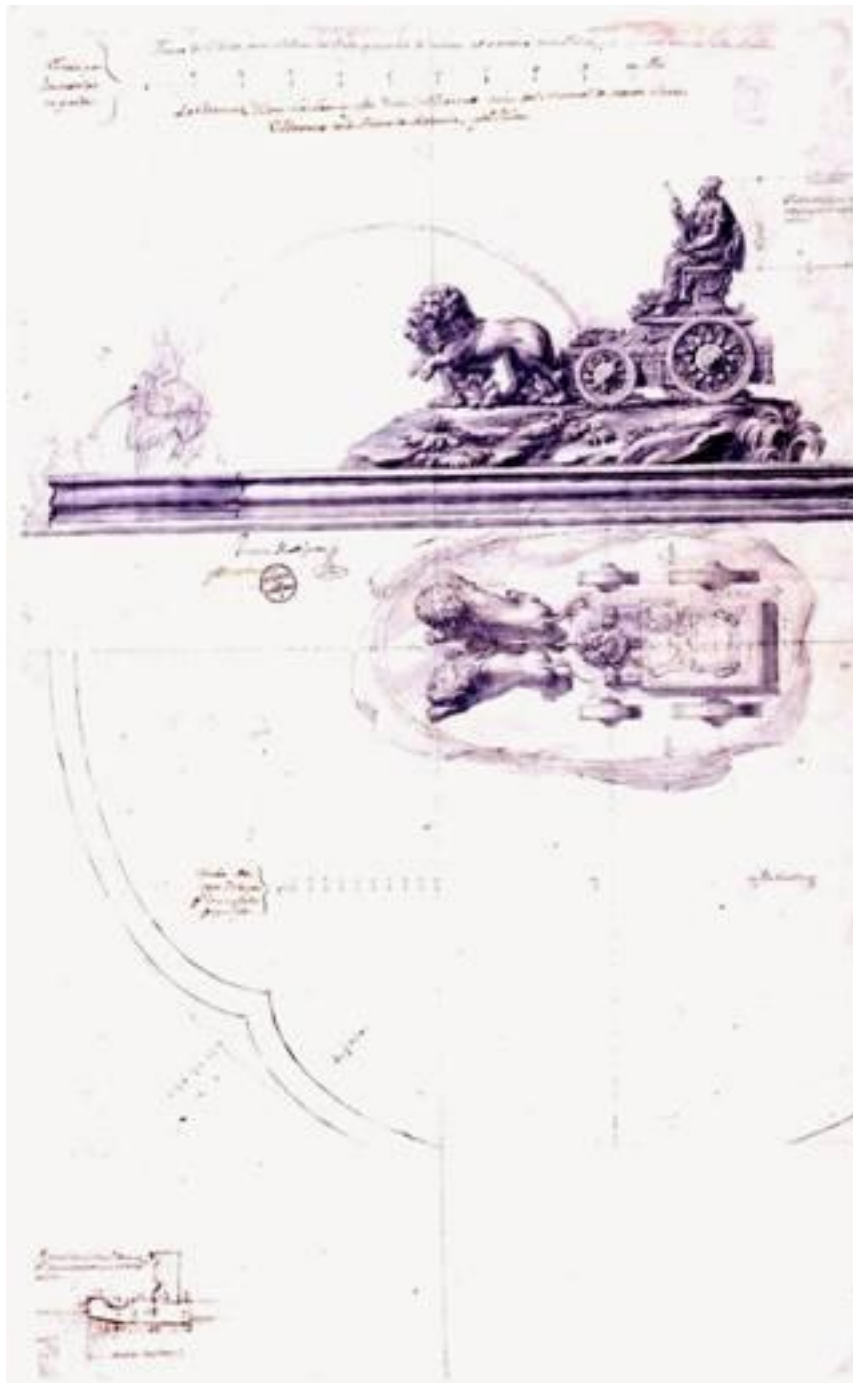
"46. Desde Torrelaguna determiné pasar por San Antonio de la Cabrera, Convento de Religiosos Observantes de San Francisco, y distante dos leguas de dicha Villa: á media legua se atraviesa el pueblo de Redueña, y cerca de este se ven las canteras donde actualmente se saca piedra, que se conduce para las nuevas fuentes del Prado de Madrid. Ya las conoce V. sabe su blancura, buena calidad, pocos poros. Y las ventajas que lleva á la de Colmenar, ambas materia caliza. Solo que esta se saca en lanchas, que hasta ahora, según tengo entendido, no pasan de tres pies de grueso: puede ser que continuando en trabajar dichas canteras, se encuentren de mayor grueso".

ANEXO Vb. Plano de la Fuente de la Cibeles con escritura de Villanueva. 1777. (Museo de historia de Madrid)

"Fuente de Cibeles para el Paseo del Prado, que se há de colocar al extremo de la Plaza, que termina en la Calle de Alcalá / Escala para / los Modelos / en grande. — ... 10. Pies / La Estatua: El Carro: Los Leones: y las Yervas del Terrazo serán del Mármol de Montes Claros. / El Terrazo de la Piedra de Redueña, y el Pílon [esto último tachado] / Ventura Rodríguez [rúbrica] / Escala de / este Dibujo. / p.a los Modelos / pequeños. — [escala] ... 30 Pies Castellanos / Razon dada á Dom.o Perez / p.a la saca de piedra en 16 de Sep.re / de 1780".

(anverso).

"8 p. es lo largo del Leon / natural desde el anca / a la cabeza / 5 al alto a la cruz"
(Anotaciones del arquitecto y sección en la parte inferior izquierda. A lápiz).



Plano diseño de la Fuente de Cibeles. Ventura Rodríguez, 1777.

ANEXO Vc. Leralta, J., 2001. Madrid: cuentos, leyendas y anécdotas, Volumen 1. Silex Ediciones, 2001 -296 páginas. REDUEÑA. Las canteras de la Cibeles.

“Probablemente fue casualidad, pero lo cierto es que Antonio Ponz (1725-1792) pasó por el lugar cuando los hermanos Gorrategui andaban en plena faena con las piedras de las fuentes del Prado, las de la Alcachofa, Apolo, Neptuno y Cibeles. Estaba preparando una especie de inventario sobre los bienes que habían dejado los jesuitas tras su marcha forzada del país después del decreto de expulsión firmado por el monarca Carlos III en 1767. Quizá por su calidad de pintor, teólogo y secretario de la Real Academia de San Fernando, le fue encargado el trabajo. Le llevó un tiempo porque su obra, resumida en 18 tomos, fue publicada en 1784 con el título Viaje por España.

En ella encontramos el dato que confirma lo que todos en el pueblo saben: “En Redueña se ven las canteras de donde actualmente se saca la piedra, que se conduce para las nuevas fuentes del Prado de Madrid”. Además por si existiera alguna duda, en los propios planos originales de las estatuas, firmados por el madrileño Ventura Rodríguez en 1777, aparecen de puño y letra las siguientes anotaciones: “La estatua, el carro, los leones y las (ilegible) serán de mármol de Montes Claros... (ilegible) de la piedra de Redueña y el pilón”.

Montes Claros es un pueblo de la provincia de Toledo, situado cerca de Talvera de la Reina. Que compite con Redueña en adjudicarse la paternidad de las fuentes. Incluso en cierta ocasión, cuando a la diosa Cibeles le amputaron una mano por excesos deportivos, hubo que buscar una prótesis de mármol en las canteras toledanas. Es muy posible a la vista de los documentos y testimonios conocidos, que se utilizara piedra de ambas localidades. Esta piedra, de merecida fama en el siglo XVIII, fue una de las elegidas, junto con la de Corpa, para levantar parte de la Real Fábrica de Paños de San Fernando de Henares. Entonces se pagó por cada sillar el precio de 202 maravedís.

Hablamos ahora de los Gorranchategui, canteros del pueblo vizcaíno de Berritz, que fueron contratados para sacar adelante el proyecto ilustrado de Ventura Rodríguez. A Redueña llegaron cuatro hermanos que posteriormente se casaron con mujeres de la comarca sembrando con su largo apellido las tierras de Torrelaguna....”

ANEXO Vd. Cibeles es de Redueña. Un pequeño pueblo reclama la paternidad de las piedras del monumento. Artículo periodístico publicado en El País el 12 de Agosto de 1994 por [Vicente González Olaya](#)

Redueña (147 habitantes) reivindica su nombre en Madrid. Este pueblo está convencido de que las piedras que se utilizaron para crear la fuente de Cibeles proceden de sus canteras, no de las de Montes Claros (Toledo), tal y como afirman los expertos. Recientemente, los técnicos restauraron la mano de la diosa arrancada por los gamberros el pasado julio con mármol toledano, y no con piedra de Redueña. “La tradición oral nunca se equivoca, y ésta señala que Cibeles fue labrada con piedra de nuestro pueblo”, comenta su alcaldesa, Consuelo Rodríguez, del PSOE. “No tenemos documentos que lo atestigüen porque todos se quemaron en el siglo pasado. Sólo contamos con la convicción absoluta de que la fuente es parte nuestra. La historia ha pasado de padres a hijos durante generaciones”.

Cuando los seguidores de la selección española de fútbol destrozaron la mano de la diosa, en Redueña se entristecieron. “Fue como si rompieran algo nuestro. En la escuela los niños aprenden que las fuentes de Cibeles y Neptuno están labradas con nuestra piedra”, comenta la alcaldesa.

Según la tradición, para sacar los bloques de mármol se contrató a un grupo de canteros vizcaínos, los Gorrachategui. Eran cuatro hermanos solteros provenientes del municipio de

Berritz. Todos se casaron con mujeres de la localidad o de pueblos cercanos. En el cementerio municipal aún se conservan sus lápidas.

Sus actuales descendientes viven tanto en Redueña como en el cercano Torrelaguna (2.550 habitantes). Mariano Gorrachategui, de 87 años, aún recuerda las historias que le relataban sus abuelos: "Mis antepasados transportaron con carros las piedras a Madrid. Todo el material se extrajo de las desaparecidas canteras de El Reboloso".

Curiosamente, en los planos originales que diseñó Ventura Rodríguez en 1777 aparece claramente el nombre de Redueña. El artista escribió sobre los planos: "La estatua, el carro, los leones y las (ilegible) serán de mármol de Montes Claros". A continuación se lee: "(Ilegible) de la piedra de Redueña y el pilón".

A finales del siglo XVIII, Antonio Ponz, secretario de la Corona y de la Real Academia de San Fernando, recorrió toda España con el fin de escribir un libro de viajes. Casualmente atravesó Redueña en el momento en el que los Gorrachategui trabajaban. De su paso por el pueblo relató: "En Redueña se ven las canteras de donde actualmente se saca piedra, que se conduce para las nuevas fuentes del Prado de Madrid".

El teniente de alcalde de Redueña, Efrén Pérez, descendiente también de los Gorrachategui, quiere que el alcalde de Madrid, José María Álvarez del Manzano, envíe al pueblo una réplica reducida de Cibeles. "Creo que nos la merecemos en desagravio por el olvido a que se nos ha sometido durante siglos", afirma.

Incluso el Patronato Madrileño de Áreas de Montaña, entidad que gestiona los recursos naturales de la sierra, reflejará en el futuro museo de La Cabrera (1.120 habitantes) la hipótesis de una Cibeles nacida en Redueña. Próximamente el Ayuntamiento de Redueña inaugurará una nueva calle. "La llamaremos Cibeles", aclara Consuelo Rodríguez.

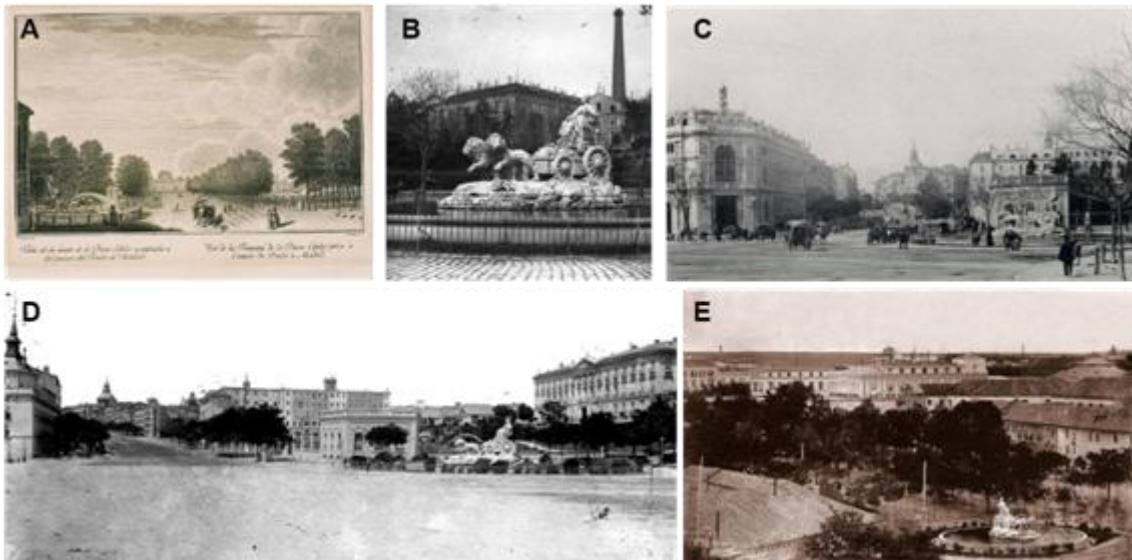
ANEXO Ve. Cibeles, una diosa tan famosa como desconocida

Fragmento de un artículo periodístico publicado en el diario ABC el 15 de Junio de 2014 por Mónica Arrizabala

Pilar González Serrano no escatima en elogios cuando describe cada uno de los detalles de la fuente madrileña. "Quienes la hicieron sabían mucho de la diosa Cibeles", asegura.

Sus investigaciones le llevan a creer que José de Hermosilla fue el responsable de que hoy Cibeles se haya convertido en la "nous", el símbolo de Madrid. A este capitán de ingenieros español, "un hombre cultísimo, que había estado en Italia", el Conde de Aranda encargó en 1767 que hiciera realidad los deseos de Carlos III de repetir en Madrid el Foro Carolino de Nápoles.

El Salón del Prado fue concebido como un circo romano con tres fuentes: la de Apolo o de las Cuatro Estaciones en el centro, la de Cibeles en el semicírculo haciendo esquina con la calle Alcalá, y la de Neptuno en el otro extremo junto a la Carrera de San Jerónimo. Ese trazado, que evoca la Piazza Navona de Roma.



Fuente de la Cibeles en su posición inicial desde distintos ángulos.

A: Grabado de la fuente de la Cibeles en su primera ubicación y al fondo la puerta de Recoletos. Museo de Historia B: Fuente de la Cibeles en 1890 C: Fuente de la Cibeles con el Banco de España ya construído D: Fuente de la Cibeles en 1886 E: Fuente de la Cibeles en 1856



Fuente de la Cibeles en distintos momentos después de su instalación en su posición actual.

A: Fuente de la Cibeles en 1900 B: Fuente de la Cibeles en 1920 C: Fuente de la Cibeles en 1920 D: Fuente de la Cibeles durante la Guerra Civil Española, 1936

ANEXO VI

**Transcripción de un fragmento del libro de Diego de Sagredo: Medidas del Romano, 1526
pág. 82.1526**

"E demás desto nos encomendaron los viejos architetos que la piedra que se saca para los dichos edificios se detenga antes que se lebre por espacio de dos años donde resciba yelos y soles y otras injurias del tiempo, porque después quedan y se haze mas fuer[t]es y mas aprouadas; y tambien porque si alguna dellas tuuiere alguna enfermedad oculta tenga lugar de mostrarla antes que se labre; y desta manera serán más durables las esculpturas y labores que en ellas despues se hizieren; [v] y de no se proueer esto acaece como cada día vemos despedaçar muchas dellas despues de labradas y deshazerse de suyo por razon que las labraon antes que se curassen".